IV-15791

éléments d'écologie appliquée

action de l'homme sur la biosphère

662244
B.C.U. IASI

FRANÇOIS RAMADE

SDA 8615 +3

EDISCIENCE

Groupe McGraw-Hill :

Auckland – Beyrouth – Bogota – Düsseldorf – Johannesbourg – Lisbonne – Londres – Lucerne – Madrid – Mexico – Montréal – New-Delhi – New-York – Panama – Paris – San Juan – Sao Paulo – Singapour – Sydney – Tokyo – Toronto –

1978

Eléments d'écologie appliquée

© Ediscience/McGraw-Hill, 1974

ISBN 2-7042-1002-0
Dépôt légal : 2e Trimestre 1978

N° d'imprimeur 210
Imprimerie Louis-Jean – 05002 GAP

2ème édition, 1978

BIBLIOTHEQUE CANTONALE
ET UNIVERSITAIRE
ANNULE
LAUSANNE/Dorigny

McGraw-Hill, Inc.
28 Rue Beaunier 75014 Paris

La Loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'Article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants-droit ou ayants-cause, est illicite » (alinéa 1er de l'Article 40).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les Articles 425 et suivants du Code Pénal.

4 61131X

LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

PREFACE

Un très grand nombre d'articles, des revues spécialisées, des livres alertent chaque jour le public des menaces qui pèsent sur l'avenir de nos conditions de vie, par suite de la croissance inquiétante des populations humaines, de la dilapidation de nos ressources naturelles, de la dégradation et de la pollution de nos milieux. Tout cela pour satisfaire aux exigences sans cesse renouvelées d'une civilisation industrielle dont le but, améliorer les conditions de vie, demeure cependant prisonnier d'une conception étriquée du bien-être. En effet, améliorer aujourd'hui les conditions de vie de l'individu, de la famille, de la société ne signifie rien si, demain, leurs descendants sont ruinés dans leur santé, ont perdu l'essentiel de leurs biens naturels et de leur raison de vivre, et si la société, voire l'espèce elle-même, est menacée de déclin. Cela rappelle une formule bien connue "C'est le père qui boit mais c'est l'enfant qui trinque".

Tout cela est si dramatiquement ressenti que quantité de jeunes sont aujourd'hui désemparés devant le fossé qui se creuse entre leur désir de plénitude de vie et l'avenir incertain qu'ils perçoivent.

On a taxé de sensiblerie l'inquiétude manifestée, parfois avec beaucoup de talent, par de nombreux écrivains. Mais les risques sont réels, ils doivent être perçus, analysés, expliqués et c'est la tâche de l'écologiste d'en parler froidement en technicien.

C'est de cette façon qu'est né l'ouvrage de François Ramade. Un ouvrage qui repose sur une documentation scientifique tenue à jour et cela dans des disciplines très variées. Un ouvrage qui enseigne et qui renseigne ; qui enseigne, car on y trouve condensé dans la première partie l'exposé des principes écologiques fondamentaux qui gèrent la biosphère ; qui renseigne, parce que partout le raisonnement s'appuie sur des faits, des chiffres qui sont rapportés, sur des expériences qui sont décrites, sur des témoignages qui sont cités.

Un ouvrage écrit avec fermeté et compétence par un écologiste qui a en même temps reçu une formation d'ingénieur, par un enseignant qui est en même temps un chercheur.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Un ouvrage qui ne fait pas appel à la sensiblerie mais qui se lit cependant avec passion et qui doit intéresser à la fois l'étudiant et l'homme cultivé.

Il est un public à qui je recommanderais volontiers ce livre, c'est celui de nos étudiants dont la formation scientifique ne comporte pas, ou insuffisamment, d'enseignement d'écologie générale et appliquée. Je pense aux futurs cadres administratifs et financiers, aux juristes, économistes, sociologues, aux architectes et urbanistes, aux ingénieurs futurs industriels et surtout peut-être aux futurs politiciens . . . mais pourquoi pas, à nos hommes politiques du jour.

Le lecteur, quel qu'il soit, appréciera l'effort de synthèse de l'auteur et la documentation considérable qu'il a rassemblée. Il appréciera également la présentation soignée et moderne de cet ouvrage.

P.PESSON
Professeur de Zoologie
et d'Ecologie
à l'Institut National Agronomique

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage est avant tout destiné aux étudiants en biologie des Universités et des Grandes Ecoles. Il correspond au niveau de deuxième année de DUES. La majeure partie des chapitres fondamentaux ou d'esprit technologique qui le composent ont été rédigés à partir de nos notes de cours. Celles-ci correspondent à nos enseignements d'Ecologie générale ou appliquée au C_4 d'Ecologie de l'Université de Paris-sud, à l'Unité de valeur d'Ecologie de Paris-VII, et à des séries de conférences que nous donnons à l'Ecole Nationale Supérieure (Rue d'Ulm), à l'Institut National Agronomique et dans le cadre du Module d'Environnement de l'Ecole Centrale. Toutefois nous en avons délibérément simplifié l'exposé pour le rendre accessible à des étudiants moins avancés ainsi qu'au lecteur disposant d'une formation scientifique mais non spécialiste. Enfin, nous espérons aussi qu'il sera utile aux agronomes, aux ingénieurs et aux médecins qui, par suite de leurs activités, sont tous concernés d'une façon ou d'une autre par les problèmes d'environnement.

Nous formulerons par ailleurs le vœu de réussir à convaincre le technologue ou l'aménageur que toute nouvelle production industrielle, toute décision relative à l'exploitation du milieu naturel, devront être envisagées à l'avenir non seulement en fonction des objectifs immédiats et précis qui la motivent, mais aussi après une évaluation sérieuse des conséquences à court et à long termes qu'elle implique pour l'ensemble de la biosphère.

A une époque où l'idéologie technocratique cherche par tous les moyens à justifier la notion de croissance quantitative indéfinie, l'écologiste se doit de montrer combien cette notion est erronée. Notre civilisation ne peut indéfiniment se développer de façon exponentielle dans un milieu limité, elle ne peut s'ériger *ad infinitum* contre la nature. Les biologistes sont aujourd'hui unanimes pour affirmer que si notre société n'évolue pas quand il est encore temps vers un état d'équilibre, d'harmonie avec la biosphère, elle la détruira et périra avec elle.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

INTRODUCTION

L'Assemblée Nationale a voté à l'unanimité, le 27 Avril 1976, une loi sur la Protection de la Nature.

Cette loi, réclamée depuis de nombreuses années par la Fédération Française des Sociétés de Protection de la Nature, et de façon plus générale, par tous ceux qui dans notre pays se préoccupent de la défense de l'environnement, comble une vacuité juridique notable, car, à la différence de la majorité des pays développés, la France ne disposait jusqu'à présent d'aucune législation sur ce sujet d'importance capitale.

Cette loi consacre à certains égards la prééminence de l'Ecologie Appliquée, discipline jusqu'alors ignorée des "aménageurs", dont l'objet consiste en l'étude des mécanismes de dégradation de la biosphère par l'homme et des principes de l'utilisation rationnelle des ressources naturelles.

La nouvelle loi sur la protection de la nature stipule en effet que toute entreprise d'aménagement susceptible d'avoir une influence sur le milieu naturel devra être obligatoirement précédée d'une étude d'impact écologique approfondie . . .

L'adoption d'un tel texte législatif traduit un changement remarquable dans l'état d'esprit des hommes politiques face aux problèmes de pollution et de dégradation des ressources naturelles.

En effet, dans un passé encore récent, au début des années 60, les propos et les écrits des quelques naturalistes clairvoyants, qui déployaient dans notre pays de louables efforts pour convaincre leurs concitoyens de l'impérative urgence d'une protection de la nature, se perdaient encore dans l'indifférence générale. Parfois même, de bons esprits les qualifiaient "d'ennemis du progrès" lorsqu'ils osaient évoquer l'antinomie qui oppose une certaine conception de la rentabilité économique et les exigences de l'environnement.

Des catastrophes révélatrices

Comment expliquer ce rapide changement d'attitude des gouvernements, et aussi de l'opinion publique, à l'égard de sujets aussi

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

préoccupants ? Certes, la Conférence organisée en septembre 1968 par l'UNESCO, sur l'utilisation et la conservation de la Biosphère, l'Année européenne de protection de la Nature et le "jour de la Terre" aux Etats-Unis, en 1970, ont conduit des hommes politiques, de hauts fonctionnaires, certains industriels et aussi le grand public, à comprendre quels graves dangers présentent, pour l'humanité, certaines formes de la civilisation moderne. Cependant, l'intérêt croissant manifesté par le profane pour la protection de la nature ne résulte pas seulement d'une activité d'information, sinon de propagande aussi intense et récente soit-elle. En Europe occidentale, plusieurs événements ont contribué, au cours de la dernière décennie, à porter l'attention des foules sur des problèmes dont seuls les biologistes saisissaient l'importance il y a peu de temps encore. Deux catastrophes, en particulier, eurent un énorme retentissement. La première remonte au 18 mars 1967, lorsqu'un superpétrolier, le "Torrey-Canyon", armé sous pavillon de complaisance, s'échoua en pleine vitesse sur les récifs des Seven-Stones, dans l'archipel des iles Scilly, à l'extrême pointe méridionale de la Grande Bretagne. En quelques jours, 117 000 tonnes de pétrole brut s'échappèrent des soutes de l'épave et se dispersèrent à la surface de l'océan. Face à cette gigantesque "marée noire", les moyens de lutte les plus divers furent mis en œuvre, souvent de façon intempestive, ce qui accrut les dommages au lieu de les restreindre : bombardement de l'épave par les avions de la RAF et surtout épandage, par la marine britannique, de 15 000 tonnes de détersifs, dont les effets sur la faune s'avérèrent beaucoup plus nocifs que ceux du pétrole. L'ampleur des dégâts fut considérable : parcs à huitres détruits, fonds marins riches en crustacés stérilisés, œufs pélagiques de "pilchards" tués sur de vastes surfaces, régression draconienne des effectifs de plusieurs espèces d'oiseaux marins comme le rare macareux moine *(Fratercula arctica).* Plages et côtes rocheuses furent souillées, tant sur le littoral cornouaillais que sur l'ile de Guernesey et les Côtes-du-Nord françaises, en particulier dans la région de Tréguier. Les dommages payés par la Compagnie armant le navire et ses assureurs s'élevèrent à plus de vingt milliards d'anciens francs, somme cependant inférieure aux dégâts réels si l'on prend en considération les effets à long terme sur la vie marine. Plus récemment, le naufrage du "Urquiola" dans la baie de la Corogne en Espagne, a montré que l'on était toujours aussi désarmé devant la catastrophe écologique constituée par une marée noire.

Mais à côté du risque quantitatif que présentent, pour l'environnement, diverses techniques modernes, existe un aspect qualitatif non moins préoccupant. On peut en effet opposer au déversement accidentel dans les eaux ou l'atmosphère de grandes masses de substances modérément nocives, celui de faibles quantités de composés chimiques de synthèse doués d'une toxicité considérable. La pollution des eaux du Rhin par l'endosulfan, un insecticide organochloré, survenue le 23 juin 1969, fournit une excellente illustration des conséquences qui peuvent en résulter. Ce jour-là, le

BUSSEL CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

fleuve fut contaminé par un tonneau de produit pur, perdu accidentellement par une péniche en aval de Bingen. Les quelques dizaines de kg de matière active qu'il contenait, suffirent pour faire périr en quelques jours plusieurs millions de poissons (jusqu'à vingt millions selon certaines estimations). Pendant une semaine, les Pays-Bas, en particulier la ville de Rotterdam, furent privés d'eau potable et leurs habitants ne disposèrent que d'eau minérale pour la consommation ménagère. On ne connaît en effet, aujourd'hui encore, aucune technique d'épuration capable d'éliminer des eaux les insecticides organochlorés.

Toutefois, malgré leur importance, les pollutions délibérées ou fortuites ne constituent qu'une des nombreuses manières par lesquelles l'homme moderne a entrepris de ruiner son propre environnement. La destruction inconsidérée des richesses naturelles : sols, forêts, vie sauvage, l'appropriation privée des sites à des fins immobilières, constituent un autre aspect fondamental des modalités par lesquelles notre civilisation organise le pillage de la biosphère. A cet égard, d'autres événements ont aussi joué au cours des dernières années, le rôle de révélateur pour l'opinion publique européenne.

Du drame de Florence à l'affaire de la Vanoise

En novembre 1966, des pluies torrentielles, et les graves inondations qu'elles provoquèrent, furent la cause de désastres sur une grande partie du territoire italien. Les parties basses de la ville de Florence furent submergées par sept mètres d'eau boueuse. Cette catastrophe dégrada de nombreuses fresques et toiles et plusieurs centaines de milliers de précieux ouvrages conservés dans les caves de la fameuse bibliothèque de cette ville. Malgré un programme d'aide internationale, organisé en hâte par l'UNESCO, de multiples œuvres ne purent être sauvées. Comme l'écrivait, à propos de ces inondations, le Professeur Pavan, leur principale cause résulte "du déboisement effectué sans discernement au cours de ces derniers siècles".

La destruction des forêts dans les régions intertropicales du monde prend une ampleur catastrophique à l'heure actuelle. En Malaisie, l'"exploitation" des forêts vierges pour exporter leurs bois précieux s'est accrue de 800 % en dix ans. Quant à la "mise en valeur" de l'Amazonie dont à peine 3 % de la superficie totale serait cultivable, elle se traduira en quelques décennies par la destruction irréversible de la plus grande forêt ombrophile du globe avec pour conséquence des désordres climatiques sérieux pour toute cette partie du continent sud-américain. La conférence de Nairobi, organisée par les Nations-Unies en septembre 1977, a mis en évidence les conséquences à la fois spectaculaires et dramatiques du recul du couvert végétal dans les régions tropicales à saison sèche prolongée. La destruction des forêts caducifoliées qui y croissaient, puis des végétaux ligneux des savanes leur ayant succédé, s'est traduite par un recul de l'ensemble du boisement accentué, dans les zones semi-

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

arides, par la quête incessante du bois de chauffe lequel fait cruellement défaut. Ainsi, peu à peu, la conjonction de diverses causes de dégradation du couvert végétal par l'exploitation humaine conduit à une aridification de ces zones. De la sorte s'installent inéluctablement l'érosion des sols et l'avancée des déserts. Dans ces régions marginales ainsi dégradées par une mauvaise gestion des ressources naturelles et relativement surpeuplée, le moindre caprice climatique peut conduire de nos jours à une catastrophe d'ampleur internationale comme l'ont montré les famines qui viennent de ravager le Sahel en date encore récente.

L'utilisation anarchique des terres, leur destruction, de même que celle des sites, par une urbanisation intempestive, constituent aussi une autre manière par laquelle les sociétés industrielles dégradent le milieu naturel.

Le scandale de la Vanoise, qui eut un énorme retentissement, non seulement dans l'opinion publique française, mais aussi dans la communauté scientifique internationale, constitue une excellente illustration de ce fait.

Celui-ci éclata le 23 mai 1969, lorsque le Conseil d'administration de ce Parc National, décida de l'amputer de 2 500 ha sur lesquels devait être édifiée une station de sports d'hiver. La zone que l'on se proposait de déclasser présentait la plus grande richesse biologique de la réserve. Elle englobait en particulier le vallon de Polset, seule région boisée du Parc et unique localisation du bouquetin *(Capra ibex)* dans les Alpes françaises. Si une puissante campagne de protestation, dont le succès surprit même ses organisateurs, réussit à faire échouer un tel projet, le fait même qu'il ait pu être présenté est fort édifiant. Celui-ci révèle un état d'esprit fort répandu chez bien des technocrates et aménageurs, lesquels considèrent les ressources et l'espace naturel comme inépuisables, sans omettre le cynisme de bien des "affairistes" dont la seule devise est "après nous le déluge".

Comprendre la menace

Le problème de la dégradation de la biosphère est donc multiforme, ainsi qu'en attestent les exemples précédents. Aussi, le biologiste se trouve aujourd'hui confronté à d'innombrables modalités d'altération de la nature, dont les effets destructeurs sont multiples et souvent inattendus. Pour reprendre le terme de M. Nicholson (1970), "la révolution de l'environnement", dans laquelle nous sommes aujourd'hui plongés, présente deux aspects. Elle se caractérise d'abord par un bouleversement de la biosphère, dont la seule responsabilité incombe à notre espèce. Mais elle peut aussi être envisagée sous un autre aspect, celui de l'absolue nécessité d'un changement d'attitude de nos semblables à l'égard du milieu naturel.

En effet, la dégradation de la biosphère ne menace pas seulement les richesses esthétiques de la terre, les éléments rares de

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

sa flore et de sa faune, aussi précieux soient-ils. Au-delà du problème de la conservation des sites vierges et de la vie sauvage se profile une question encore plus préoccupante, celle de la disparition des ressources indispensables à la survie de l'humanité.

A une époque où, selon toute apparence, les effets de l'explosion démographique ne préoccupent encore qu'une minorité de nos semblables, il serait temps que les autorités politiques de chaque pays mettent rapidement en œuvre une coopération internationale efficace pour utiliser rationnellement et préserver les ressources de la biosphère.

Sauver l'homme, c'est d'abord protéger la nature. En ce domaine, le biologiste seul peut apporter les arguments qui prouvent cette inéluctable nécessité. Nous allons essayer de le montrer dans ce qui suit.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Cependant, quantité de considérations nouvelles, exposées dans cet ouvrage, doivent naturellement, dès leur première énonciation, prévenir défavorablement le lecteur, par le seul ascendant qu'ont toujours celles qui sont admises, en général, sur de nouvelles qui tendent à les faire rejeter. Or, comme ce pouvoir des idées anciennes sur celles qui paraissent pour la première fois favorise cette prévention, surtout lorsque le moindre intérêt y concourt, il en résulte que, quelques difficultés qu'il y ait à découvrir des vérités nouvelles, en étudiant la nature, il s'en trouve de plus grandes encores à les faire reconnaître.

Lamarck : *Philosophie zoologique*

PREMIÈRE PARTIE

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA BIOSPHÈRE SES INTERACTIONS AVEC L'ESPÈCE HUMAINE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Chapitre I — La notion de biosphère 11
Qu'est-ce que la biosphère ? 11
Définition, structure et évolution 11
Origine du flux d'énergie dans la biosphère : la photosynthèse 13
La notion d'écosystème. Les grandes subdivisions de la biosphère 18
Zonation des macroécosystèmes : les grandes subdivisions de la biosphère 21
Répartition en latitude 23
Zonation en altitude 45
Cycle de la matière et flux d'énergie dans la biosphère 49
Chaînes et réseaux trophiques 51
Circulation de la matière dans les écosystèmes
Les grands cycles biogéochimiques 57
Cycle de l'eau 59
Cycle du carbone 63
Le cycle de l'oxygène 68
Cycle de l'azote 70
Le cycle du soufre 75
Le cycle du phosphore 77
Les flux d'énergie dans la biosphère 80
Le flux solaire 80
Notion de production et de productivité primaire 83
Notion de pyramide écologique. Efficacité des écosystèmes 83
Les pyramides des nombres 84
Pyramide des biomasses 84
Pyramide des énergies. Efficacité des écosystèmes 85
Diagramme général du flux d'énergie dans un écosystème 89
Productivité des écosystèmes 91
Productivité secondaire 99
Succession des communautés 105

MINESCU" IA
GEOLOGIE-GEOGRAFIE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

I
LA NOTION DE BIOSPHERE

QU'EST-CE QUE LA BIOSPHERE ?

Définition, structure et évolution

La notion de biosphère fut dégagée pour la première fois par le génial Lamarck dans sa géochimie dont les conceptions, bien qu'exprimées de façon archaïque, étaient comme tant d'autres idées de ce savant, fort en avance pour leur époque. C'est cependant au soviétique Vernadsky que revint le mérite de créer ce terme et surtout de systématiser ce concept en lui conférant ses fondements scientifiques dans une publication datée de 1926.

La biosphère peut se définir de façon la plus simple comme *la région de la planète qui renferme l'ensemble des êtres vivants et dans laquelle la vie est possible en permanence.* En effet, toute la surface du globe terrestre n'est pas également favorable aux organismes. On y rencontre des territoires comme les calottes polaires et les hautes montagnes, où aucun végétal ne peut se développer et où l'on ne recueille que de rares spores de bactéries ou de champignons. Certains vertébrés supérieurs (oiseaux en migration par exemple) peuvent à l'occasion y faire une incursion mais en aucun cas ne peuvent s'y établir. De telles zones marginales ont été dénommées *parabiosphériques* (1).

(1) On désigne parfois sous le terme d'Ecosphère l'ensemble constitué par la Biosphère, les zones parabiosphériques, la haute atmosphère et la lithosphère.

En première approximation, la biosphère peut se subdiviser en trois régions de nature physique différente :

— la *lithosphère,* terme pris ici en un sens restrictif, c'est-à-dire limité aux couches les plus superficielles de l'écorce terrestre. C'est en quelque sorte le milieu solide constitué par l'ensemble des continents émergés ;

— l'*hydrosphère* ou océan mondial, milieu liquide qui recouvre les sept dixièmes de la surface planétaire ;

— l'*atmosphère,* couche gazeuse homogène, qui constitue la zone la plus périphérique de notre planète et enveloppe les deux précédents milieux.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Parmi les multiples caractères qui font la spécificité de la biosphère, deux d'entre eux sont tout à fait primordiaux :

— l'*eau* s'y rencontre en permanence à l'état liquide ;

— la *lumière* solaire la baigne d'un flux continu lequel constitue le seul apport énergétique au système. C'est à partir de cette seule source d'énergie exogène que les végétaux et indirectement les animaux élaborent toutes les substances organiques dont ils ont besoin pour produire l'énergie chimique, mécanique, osmotique, etc., nécessaire à leur croissance, leur reproduction, leurs fonctions de relation, etc.

La biosphère apparaît comme une mince pellicule superficielle si l'on prend en considération l'énormité du volume du globe terrestre. Cependant cette couche, dont l'épaisseur n'excède pas quelques kilomètres, constitue une entité extraordinairement complexe. Sa composition actuelle résulte de l'effet continu des êtres vivants, dont les origines remontent à plus de trois milliards d'années ([1]), sur le milieu physico-chimique qui caractérise les couches superficielles de notre planète. C'est l'influence permanente des organismes sur les éléments minéraux pendant toute la durée des temps géologiques qui a conféré à la lithosphère, à l'hydrosphère et à l'atmosphère leurs compositions actuelles.

Ainsi, les immenses dépôts de matières organo-minérales que l'on rencontre de nos jours, ou de matières organiques comme l'humus — les matières biogènes au sens où l'entendait Vernadsky — sont bien le produit de cette activité des êtres vivants. Il en est de même pour de nombreuses roches sédimentaires (les matières biocosmiques, comme les dénommait ce même auteur) qui proviennent, dans la plupart des cas, des effets conjugués de facteurs géomorphologiques et biologiques. Ainsi, les bancs de calcaires compacts ou de craie, dont l'épaisseur peut atteindre plus d'un kilomètre dans certaines formations, ne sont autres que du carbonate de calcium provenant du dépôt, en nombre incommensurable, d'exosquelettes de microorganismes marins qui s'accumulèrent au fond des océans, il y a plus de 70 millions d'années.

De même, l'atmosphère actuelle est d'une composition fort différente de l'atmosphère terrestre primitive. Celle-ci était presque dépourvue d'oxygène (au maximum 0,1 % de sa teneur d'aujourd'hui), riche en gaz carbonique, en méthane et en divers composés de l'azote. Ce sont les bactéries autotrophes et surtout les végétaux chlorophylliens qui, par leur activité photosynthétique, ont fixé le gaz carbonique sous forme de matières organiques et modifié de la sorte la composition de l'air, de l'eau et du milieu minéral, leur conférant leurs caractéristiques actuelles.

Ce phénomène débuta il y a deux milliards d'années lorsque se différencièrent les premiers organismes photosynthétiques et fixateurs de l'azote atmosphérique. Il s'accéléra lorsqu'apparurent

(1) Le plus ancien organisme connu est une bactérie dénommée *Eobacterium,* découverte dans la formation de Figtree en Afrique du sud et dont l'âge est estimé à 3,2 milliards d'années. Toutefois, il existe des preuves paléogéochimiques qui montrent que des organismes vivants ont existé avant cette date. On a en effet mis en évidence des "fossiles chimiques" correspondant à des molécules propres aux cellules vivantes (porphyrines, isoprénoïdes, stérols, acides aminés, sucres, etc.) dans des sédiments précambriens d'âge antérieur à la formation de Figtree.

BUNSEN CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

(1) Les premiers organismes capables de réaliser la photosynthèse étaient des procaryotes, c'est-à-dire des êtres vivants dont les cellules sont dépourvues du noyau apparent ; il s'agissait probablement d'algues bleues, que l'on a dénommées *Gunflintia*, découvertes dans les formations antécambriennes de gunflint dans l'Ontario.
Les plus anciens eucaryotes fossiles connus, organismes dont les cellules renferment un noyau différencié, ont été découverts dans les dolomites d'Upper Beck, en Californie.

les eucaryotes, un demi-milliard d'années plus tard (1). Il se traduisit par le dégagement d'une grande quantité d'oxygène, tandis que l'air s'appauvrissait simultanément en gaz carbonique.

Il y a un milliard d'années environ, on estime que l'atmosphère présentait une teneur en oxygène à 1 % de sa concentration actuelle. Vers cette époque il semble que l'activité photosynthétique du phytoplancton présenta une subite augmentation. Ce fait est mis en rapport avec l'apparition d'ozone en quantité suffisante pour arrêter les rayons ultraviolets dans les couches les plus superficielles des eaux où les organismes qui le composent purent profiter de la plus grande intensité du flux solaire.

Il y a plus de 600 millions d'années, au début des temps primaires, apparut dans la biosphère un autre processus évolutif de la plus haute importance : la colonisation des continents émergés par les êtres vivants. Ici encore interviennent, en premier lieu, les végétaux inférieurs autotrophes. Mais l'apparition des plantes vasculaires, lesquelles commencèrent à se différencier aux alentours de — 500 millions d'années (genre *Cooksonia* du Silurien supérieur de Grande Bretagne), exerça une influence fondamentale sur l'évolution ultérieure de la biosphère. Les gymnospermes apparurent pendant le Dévonien, il y a 350 millions d'années, puis les plantes à fleurs — ou angiospermes — il y a 100 millions d'années, à la fin du Jurassique.

L'expansion des végétaux supérieurs à la surface des terres émergées s'accompagna d'un fort accroissement de la teneur en oxygène de l'atmosphère. Celle-ci passa de 3 % environ de la teneur actuelle aux débuts du primaire (— 700 millions d'années) à 50 % aux débuts du Crétacé (cf. tableau I).

ORIGINE DU FLUX D'ENERGIE DANS LA BIOSPHERE : LA PHOTOSYNTHESE

La biosphère, telle que nous la connaissons aujourd'hui, apparaît donc, du point de vue évolutif, comme le résultat d'une conjonction extraordinaire de circonstances favorables de nature cosmique, géophysique et géochimique. Cependant, l'élément essentiel dont le rôle a été déterminant dans sa genèse est d'essence biologique ; il s'agit de l'apparition de divers organismes capables de réaliser la photosynthèse, c'est-à-dire d'utiliser une source d'énergie exogène — en l'occurence celle transportée par une fraction du flux solaire — pour synthétiser à partir du gaz carbonique, de l'eau (et d'éléments minéraux), toutes les substances organiques indispensables à la vie. Ces organismes (végétaux autotrophes) sont capables de réaliser la conversion de l'énergie lumineuse en énergie biochimique.

XH_2 est un donneur d'électrons

H l'hydrogène

X l'oxygène, le soufre ou diverses matières organiques réductrices.

La réaction générale de la photosynthèse peut s'écrire sous la forme suivante :

$$n\,CO_2 + 2n\,H_2X + \text{énergie lumineuse} \xrightarrow[\text{ou autres pigments}]{\text{Chlorophylles}} n\,[(CH_2O)] + \frac{n}{2}X_2 + H_2X \qquad (1)$$

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau I Evolution chronologique de la biosphère et de ses principales subdivisions

Années	Epoque stratigraphique	Biosphère	Lithosphère	Hydrosphère	Atmosphère
5×10^9			Formation du système solaire		
$4{,}5 \times 10^9$	AZOIQUE		Plus anciennes roches connues	Condensation des océans	
4×10^9			Plus anciens sédiments		Pas d'oxygène libre, atmosphère réductrice
3×10^9		Premier procaryote connu	Dépôts stratifiés de fer		
			Glaciations	Début de la formation d'oxygène avec oxydation des sédiments marins ferreux en oxyde ferrique	
2×10^9	(EOZOIQUE) PRECAMBRIEN	Premiers organismes photosynthétiques Premiers eucaryotes			Oxygène dans l'atmosphère $\nearrow O_2$ $\searrow CO_2$
			Volcanisme important		
		Accroissement rapide du phytoplancton		Vie du phytoplancton possible dans les couches superficielles des eaux	Oxygène a 1 % du taux actuel dans l'atmosphère Ecran d'ozone formé
			Glaciations antécambriennes		
7×10^8	CAMBRIEN	Apparition des métazoaires			Oxygène de 3 à 10 % du taux actuel
	ORDOVICIEN				
5×10^8	(PALEOZOIQUE) SILURIEN	Apparition des plantes vasculaires et des insectes	Glaciation ordosilurienne du Sahara		

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

	ERE PRIM.	DEVONIEN CARBONIFERE		Glaciation carbonifférienne. Formation du charbon	
$2{,}25 \times 10^8$		PERMIEN			Les océans continuent d'augmenter de volume
	ERE SECONDAIRE (MESOZOIQUE)	TRIAS	Apparition des mammifères	Volcanisme important	Accroissement de l'oxygène atmosphérique à un taux fluctuant
10^8		JURASSIQUE	Apparition des angiospermes (plantes à fleurs)		
7×10^7		CRETACE		Dépôt de la craie et du gypse dans les sédiments	
	ERE TERTIAIRE (COENOZOIQUE)	EOCENE		Formation des lignites	
5×10^7		OLIGOCENE	Apparition des graminées	Volcanisme important	
2×10^7		MIOCENE	Diversification des mammifères		Oxygène à un taux proche de sa concentration actuelle dans l'atmosphère
10^7			*Eopithecus*, premier primate de la lignée Anthropoïdienne		
		PLIOCENE	*Homo habilis* (premier hominien connu)		
10^6		QUATERNAIRE	Paléanthropiens	Glaciations	niveau des mers à — 120 m au-dessous du niveau actuel Oxygène au taux actuel

BCU IFASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les sulfobactéries utilisent du SH_2 pour réaliser cette réaction : chez d'autres bactéries autotrophes, X représente une substance organique.

Dans le cas le plus répandu, celui de l'assimilation chlorophyllienne (plantes vertes), X est l'oxygène.

Si l'on prend $n = 6$, la réaction photosynthétique s'écrit alors :

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O + 673\ \text{kcal} \xrightarrow{\text{chlorophylles}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O \qquad (2)$$

(glucose, fructose)

Grâce à l'assimilation chlorophyllienne, le végétal peut réaliser diverses biosynthèses très endergoniques.

La photosynthèse comporte plusieurs étapes qui se résument en ceci : dans une première phase dite "lumineuse", l'excitation des chlorophylles par les photons correspondant aux longueurs d'ondes de 670 et 680 mμ s'accompagne d'une perte d'électrons par celles-ci. Les molécules de chlorophylles excitées par la lumière vont catalyser la *photolyse de l'eau,* c'est-à-dire la décomposition de l'eau en oxygène (qui se dégage dans l'atmosphère) et en protons selon le schéma ci-contre.

$$H_2O \longrightarrow 2H_+ + \frac{1}{2}\,O_2 + 2e$$

En outre l'énergie captée par les électrons que perd la chlorophylle va être mise partiellement en réserve sous forme chimique au cours des photophosphorylations (synthèse d'ATP).

Enfin, au cours de la phase lumineuse s'effectue la production du pouvoir réducteur ($NADPH_2$) par transfert des électrons perdus par la chlorophylle et des protons provenant de la photolyse de l'eau sur le NADP (cf. fig. 1.1).

Dans la seconde phase (dite "obscure" parce qu'elle s'effectue en l'absence de lumière) se produisent la *réduction du gaz carbonique* atmosphérique et la synthèse (cycle de Calvin) de sucres, de glycérol, d'acides gras et d'acides aminés, grâce au $NADPH_2$ et à l'ATP fabriqués pendant la phase lumineuse.

L'apparition des plantes chlorophylliennes sur les continents émergés n'a pas seulement présenté un effet drastique sur la composition de l'atmosphère terrestre, dont elle a considérablement accéléré l'enrichissement en oxygène. En effet, les divers végétaux vasculaires conjuguèrent leur action à celle des facteurs climatiques pour attaquer les roches de la croûte terrestre et jouèrent ainsi un rôle déterminant dans la genèse des sols. Dans certains cas toute-

BUNDESZENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

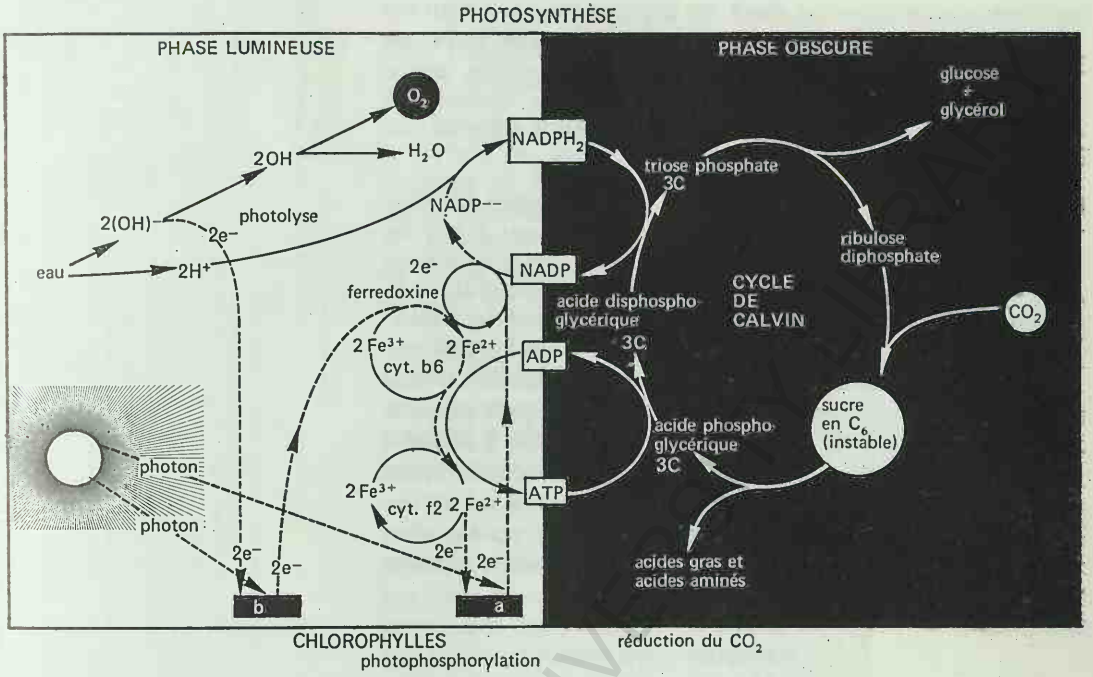


Figure 1.1
Schéma général des principales étapes de la photosynthèse

fois, les espèces animales intervinrent aussi dans les processus pédogénétiques.

Cette action des êtres vivants sur les matières minérales se traduisit en définitive par l'absorption, la mise en circulation, la dissolution dans les eaux et le rejet dans l'atmosphère de nombreux éléments puisés dans les divers milieux.

Toutes ces transformations, dites *biogéochimiques,* se poursuivent de nos jours et en ce sens, l'objet même de cet ouvrage est de déterminer, d'évaluer, l'influence sur ces dernières d'une espèce animale particulière . . .

Des masses considérables de matières organiques ont été élaborées par les êtres vivants autotrophes au cours des temps géologiques. Toute cette production n'a pas été recyclée, une grande partie a été au contraire stockée peu à peu dans les sédiments marins et continentaux, ainsi que dans les sols. Les énormes dépôts de combustibles fossiles : houille, lignite, pétrole témoignent de l'importance de ce phénomène. Celui-ci correspond, en dernière analyse, à la mise en réserve sous forme d'énergie chimique d'une partie du flux d'énergie solaire qui baigna la surface terrestre pendant des centaines de millions d'années. Elle est la conséquence de l'appauvrissement de l'atmosphère primitive en gaz carbonique avec, pour contrepartie, son enrichissement en oxygène. De la même façon, tout l'oxygène produit par les

BCU IASI / CENTRALA UNIVERSITARA

procaryotes autotrophes au début des périodes éozoïques n'est pas resté dans l'atmosphère mais a réagi avec certaines roches et minéraux superficiels qu'il oxyda. C'est ainsi, par exemple, que se sont constitués les énormes dépôts ferrugineux de l'Ontario où s'accumulèrent des couches de sesquioxyde de fer épaisses de plusieurs mètres, il y a deux milliards d'années environ.

En définitive, les êtres vivants, par leur action continue pendant trois milliards d'années, ont bouleversé peu à peu les conditions physico-chimiques qui régnaient à la surface du globe à la fin de l'époque azoïque. L'air, les océans, la lithosphère dans laquelle les sédiments se sont accumulés sur des kilomètres d'épaisseur, ont été profondément modifiés, tant dans leur composition que dans leur structure, par les divers processus biogènes. On peut affirmer que, de nos jours, tous les atomes des principaux éléments chimiques constituant la matière vivante ont traversé, à plusieurs reprises, d'innombrables organismes au cours de multiples cycles complexes. Comme l'a écrit Kovda (1968), la surface de la terre telle que nous la connaissons aujourd'hui est le produit d'un phénomène ininterrompu de "biologisation", dont l'espèce humaine représente l'ultime stade évolutif.

La notion d'écosystème. Les grandes subdivisions de la biosphère

Le caractère le plus remarquable de la biosphère, celui qui ne peut échapper à l'attention de l'observateur le moins averti, est l'asymétrie fondamentale de sa structure. L'irrégularité absolue, que présentent la distribution des océans et des continents ou le relief des terres émergées, s'accompagne d'une variabilité incroyable dans la composition des roches donc des sols, des eaux continentales et océaniques, et dans la nature des climats.

La diversité des caractères physico-chimiques, dont l'ensemble constitue les facteurs abiotiques (c'est-à-dire inorganiques) propres à chaque milieu terrestre, est telle qu'aucun habitat (1) terrestre ou marin n'est vraiment identique à un autre habitat comparable mais situé en une autre localisation géographique.

(1) L'habitat peut être défini comme l'emplacement où vit un organisme et son environnement immédiat tant inorganique qu'organique.

Cette infinie diversité des milieux biosphériques a provoqué l'apparition de multiples radiations évolutives. Celles-ci ont conduit à la genèse d'un nombre immense d'espèces vivantes végétales et animales. N'a-t-on pas inventorié depuis Linné, quelque 100 000 espèces de plantes vertes, 3 000 espèces de mammifères, 25 000 espèces d'oiseaux, plus encore de poissons et près d'un million d'espèces d'insectes sur un nombre total estimé à trois millions ?

La distribution de ces espèces est encore plus irrégulière que la structure du milieu physique où elles vivent. Il s'en faut de beaucoup, en effet, que les végétaux et les animaux présentent une répartition homogène sur la surface de la terre.

UNIVERSITY LIBRARY

La densité du peuplement, la masse totale d'organismes vivants (*biomasse*) varient dans de fortes proportions selon les régions de la biosphère.

Les eaux peu profondes des côtes marécageuses, les estuaires, la surface de certaines zones océaniques, les sols des forêts tropicales ou tempérées humides, de nombreuses prairies holarctiques, présentent de très fortes concentrations en matière vivante. A l'opposé, la biomasse est très faible dans les toundras boréales, les déserts intertropicaux et les eaux bleues superficielles des mers chaudes.

Malgré l'extrême irrégularité de limites et d'étendue des divers milieux biosphériques, les énormes variations que l'on rencontre dans la nature des espèces qui y vivent et l'importance de leur biomasse, les écologistes ont pu montrer que la biosphère n'est pas peuplée de façon anarchique par les êtres vivants.

On peut distinguer au contraire un certain nombre de communautés spécifiques, associations de micro-organismes, plantes et animaux, inféodées à un milieu déterminé. Chaque communauté que l'on dénomme *biocœnose,* présente un haut degré d'organisation dans les relations réciproques entre les divers individus, populations et espèces qui la composent.

Chaque biocœnose se développe sur un substrat inorganique occupant une surface ou un volume variable et soumis à des conditions dont les dominantes sont homogènes, que l'on dénomme *biotope.* Ce dernier est donc caractérisé par un ensemble de facteurs abiotiques, de nature physique ou chimique : localisation géographique, intensité du flux solaire, vent, température, hygrométrie, courants (en milieu aquatique), concentration en éléments minéraux fondamentaux (eau, gaz carbonique, oxygène, calcium, nitrate, phosphate, etc.). Chaque biotope constitue donc le support physique d'une biocœnose spécifiquement définie par un ensemble de facteurs écologiques dont la conjonction en fait l'originalité.

Il est possible de distinguer, parmi les divers milieux et les innombrables êtres vivants qui peuplent la biosphère, un ensemble d'unités fonctionnelles, de nature écologique, stables dans le temps, dénommées *écosystèmes.*

L'association à un environnement physico-chimique spécifique — le biotope — d'une communauté vivante ou biocœnose, constitue un écosystème. Tansley (1935) a pu écrire la relation suivante :

$$\text{écosystème} = \text{biotope} + \text{biocœnose}$$

Biotope et biocœnose exercent l'un sur l'autre une interaction perpétuelle marquée essentiellement par d'incessants transferts d'énergie entre ces deux entités et à l'intérieur de chacune d'elles.

Tout écosystème comporte un ensemble d'espèces animales et végétales qui peuvent être réparties en trois groupes, selon les modalités de leur nutrition. Les plantes chlorophylliennes, capables

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

de réaliser la photosynthèse, qui se satisfont d'éléments minéraux pour synthétiser les substances biochimiques indispensables à leur croissance et à leur reproduction, sont de ce fait dénommées *autotrophes* (étymologiquement : qui se nourrit lui-même). L'ensemble des végétaux autotrophes d'une communauté représente les *producteurs* de l'écosystème, terme d'ailleurs impropre car leur fonction consiste avant tout en une transformation d'énergie lumineuse en énergie chimique.

Par ailleurs, un écosystème renferme toujours un ensemble d'organismes hétérotrophes, lesquels exigent pour leurs besoins trophiques la présence de matières organiques. Ces derniers présentent une activité métabolique largement complémentaire de celle des autotrophes.

On distingue deux catégories d'*hétérotrophes.* Celle des *consommateurs* correspond aux animaux. Ces derniers présentent un régime macrophage : ils ingèrent des aliments figurés, soit végétaux (herbivores) soit animaux (carnivores). L'autre catégorie est constituée par les *décomposeurs.* Ce sont des microorganismes ou des végétaux pluricellulaires de petite taille : bactéries et champignons. Les décomposeurs sécrètent des substances enzymatiques qui dissolvent les matières organiques mortes, les excreta des animaux et d'autres détritus (digestion extracellulaire) et absorbent les lysats qui résultent de l'action de leurs exoenzymes. Comme ils présentent en outre une activité physiologique intense, caractérisée par un métabolisme beaucoup plus rapide que celui des autres hétérotrophes, ils réalisent une prompte minéralisation des déchets organiques, lesquels sont ainsi recyclés et réutilisés par les producteurs.

Il résulte de ces liens trophiques dans un écosystème que les relations énergétiques entre ces trois catégories sont toujours univoques, et vont toujours dans le sens

$$\text{autotrophes} \longrightarrow \text{hétérotrophes}$$

ou de façon plus complète :

$$\text{autotrophes} \longrightarrow \text{consommateurs} \longrightarrow \text{décomposeurs}$$

de sorte que le schéma d'écoulement de l'énergie dans un écosystème correspond toujours à un modèle thermodynamiquement ouvert (Fig. 1.2).

Les trois catégories précédentes d'organismes se rencontrent dans tous les écosystèmes. Elles constituent, sur le plan écologique, les trois règnes fonctionnels de la nature, caractérisés chacun par un type de nutrition et le recours à une source d'énergie particulière. Le domaine le plus original de l'écologie, par rapport aux autres sciences biologiques, est celui de l'étude des relations obligatoires, qu'elles soient causales ou d'interdépendance, entre les trois catégories d'êtres vivants que renferme chaque biocœnose.

BUVISI CENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

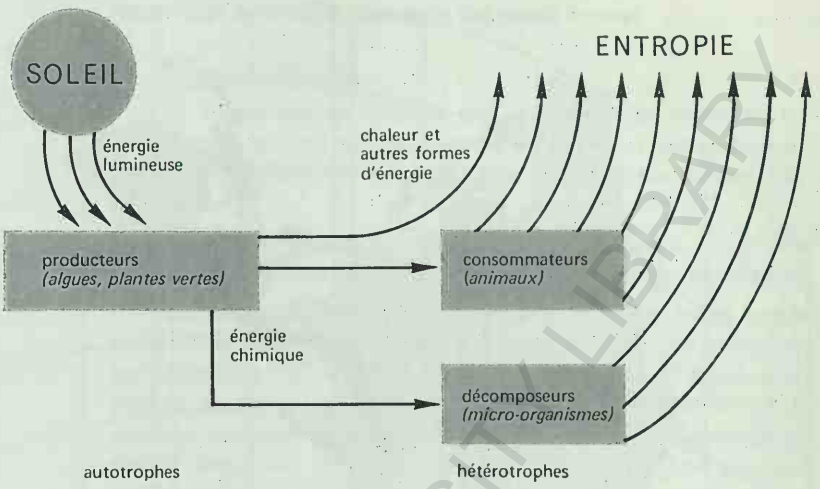


Figure 1.2
Le flux de l'énergie dans la biosphère

L'écosystème constitue en définitive l'unité structurale de base de la biosphère. Chacun couvre une surface terrestre ou océanique dans laquelle règnent des conditions homogènes, quelle que soit son étendue. Ses dimensions peuvent se chiffrer en m^2 ou en milliers de km^2, — en épaisseur ils peuvent occuper quelques centimètres (sols désertiques), des dizaines de mètres (forêts ombrophiles tropicales), voire des kilomètres (milieu océanique).

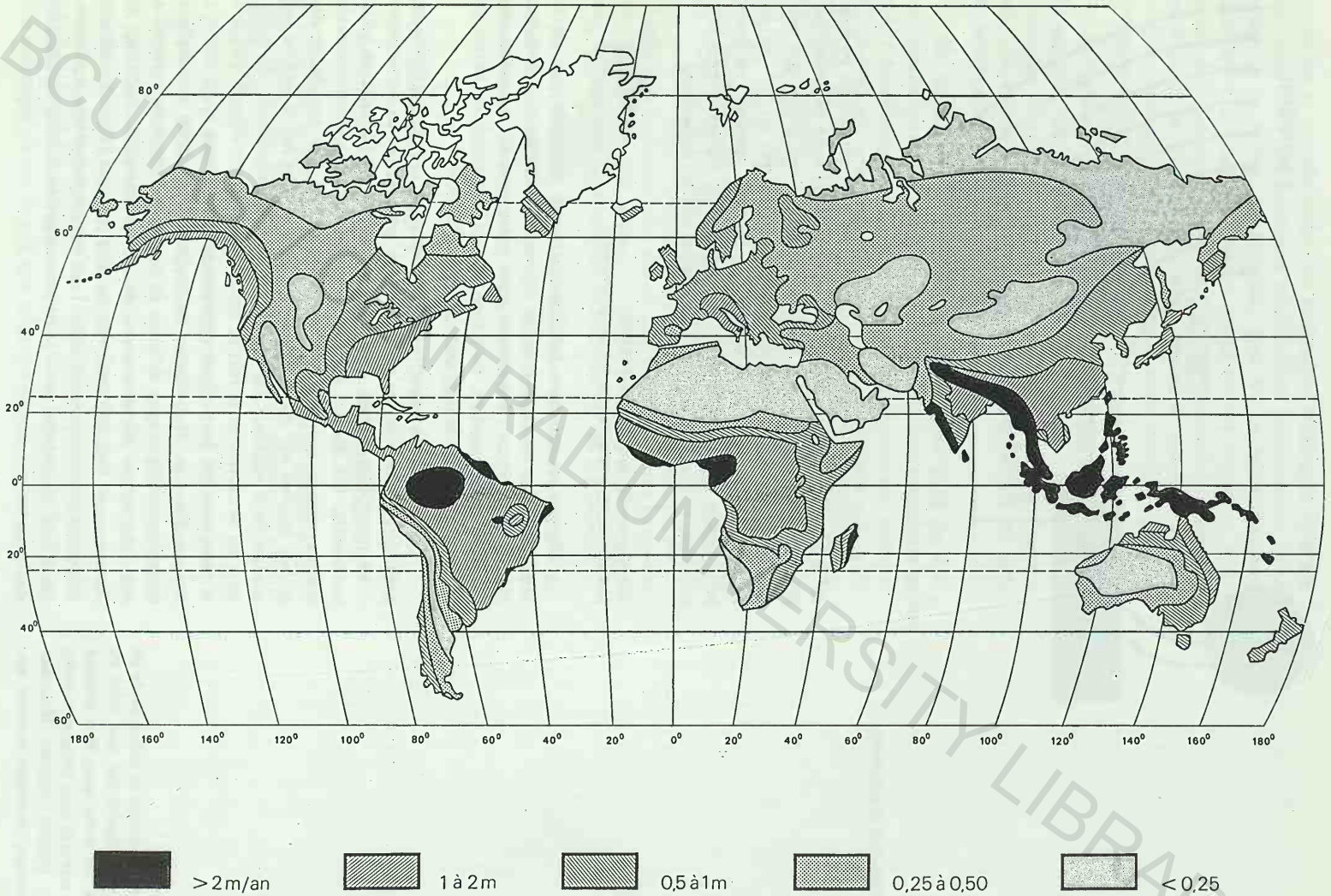
ZONATION DES MACROECOSYSTEMES : LES GRANDES SUBDIVISIONS DE LA BIOSPHERE

Malgré la structure fondamentalement dissymétrique de la biosphère, on constate que les divers écosystèmes n'y sont pas distribués de façon désordonnée mais présentent au contraire une zonation assez régulière, tant dans le plan horizontal (ou plutôt en latitude) que dans le plan vertical (en altitude).

L'étude de la répartition géographique des écosystèmes ne peut être entreprise qu'au niveau des grandes unités écologiques — les macroécosystèmes — lesquelles s'étendent à l'échelle de sous-continents. On désigne sous le terme de *biomes* les communautés d'êtres vivants qui peuplent de telles entités. La spécificité des grands biomes est conditionnée en premier lieu par la nature des groupements végétaux (phytocœnose) qui les constituent. En effet, tous les écosystèmes terrestres doivent leur aspect caractéristique à la mosaïque des formations végétales qui y croissent et confèrent à chacun d'eux sa physionomie particulière. Cependant, le complexe biologique désigné sous le terme de biome englobe aussi l'ensemble des organismes décomposeurs de la communauté, bactéries et champignons (saprophytes) et celui des animaux. Ainsi l'ensemble des constituants de la biomasse(1) des steppes tempérées, du Sahara, de la forêt guinéenne, de la taïga etc., constituent autant de biomes distincts. . .

(1) On dénomme biomasse la masse totale de substance vivante présente sur une unité de surface donnée. Ce terme peut être employé à un sens plus restrictif pour désigner la quantité totale de matière végétale (Biomasse végétale) ou animale (Biomasse animale) etc.

BUNIASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



BCU LAUSANNE - UNIL - UNIVERSITY LIBRARY

Répartition en latitude : structure des grands biomes

Biomes continentaux

La répartition en latitude des grands biomes terrestres est conditionnée en premier lieu par les climats ; les autres facteurs abiotiques n'interfèrent que dans une moindre mesure avec leur distribution.

Si l'on chemine de l'équateur aux pôles, on observe une certaine symétrie dans la répartition des divers biomes sur chaque hémisphère.

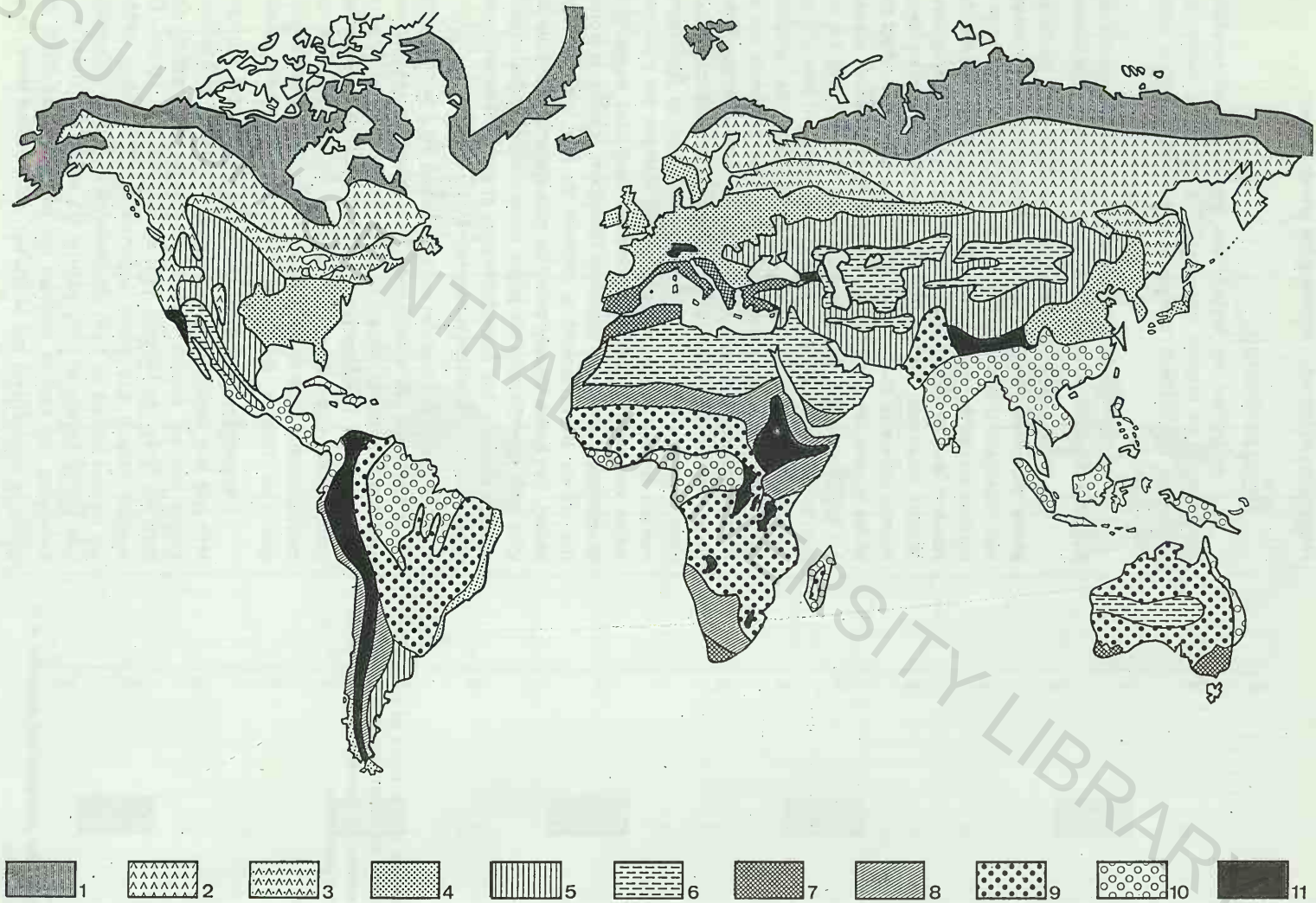
Les *forêts vierges tropicales,* encore dénommées forêts hygrophiles sempervirentes ou forêts pluvieuses ombrophiles atteignent leur maximum d'extension à l'équateur et forment un ruban quasi continu au niveau de la zone intertropicale. Ces territoires correspondent aux régions de la biosphère qui reçoivent la quantité de chaleur maximale. De plus, le flux solaire les illumine avec une relative constance tout au long de l'année. Les forêts vierges ombrophiles exigent des précipitations abondantes et régulières, supérieures à 1 500 mm par an. La comparaison des figures 1.3 et 1.4 montre que les territoires qu'elles occupent se superposent avec une exactitude remarquable aux zones intertropicales de pluviométrie maximum. Ces forêts exigent pour leur développement des conditions écologiques particulières auxquelles leurs diverses dénominations font d'ailleurs allusion : précipitations abondantes et régulièrement réparties au cours du cycle annuel, état de feuillaison permanent (sempervirence), adaptation des végétaux qui y croissent et même des espèces arborées dominantes dans leurs jeunes stades, à se développer dans une ambiance faiblement éclairée, la frondaison des grands arbres captant la majorité du flux lumineux (ombrophilie). Ces forêts figurent parmi les plus anciennes de la planète car elles sont pratiquement les seules formations végétales climaciques qui ont échappé aux bouleversements phytocoenotiques provoqués par les grandes glaciations quaternaires.

Les forêts ombrophiles se caractérisent par une diversité spécifique maximale, une stratification(1) complexe et une biomasse sur pied très importante. Malgré une opinion très répandue, les arbres dominants qui la composent tout en atteignant à maturité une grande taille – 30 à 40 m en moyenne – ne sont pas d'une hauteur exceptionnelle. Celle-ci est même nettement plus faible que celle que l'on observe dans bien des forêts tempérées primitives.

L'extraordinaire diversité des forêts ombrophiles tropicales est telle que leur peuplement animal et même végétal sont aujourd'hui encore fort mal connus. Il existe p.e plus de 2 000 espèces d'arbres dans les forêts de Malaisie, plus de 600 en Côte d'Ivoire. On dénombre jusqu'à 423 arbres appartenant à 87 espèces différentes sur un seul hectare de forêt amazonienne et plus de 200 espèces sur une même surface en indo-malaisie ! L'aspect des arbres est assez homogène, les espèces arborées qui composent les forêts ombrophiles se caractérisent par la couleur claire de leur tronc, la grande

(1) On désigne sous le terme de stratification les modalités de répartition en hauteur des diverses espèces qui constituent le peuplement végétal d'un écosystème.

Figure 1.3
Distribution des précipitations annuelles à la surface du globe



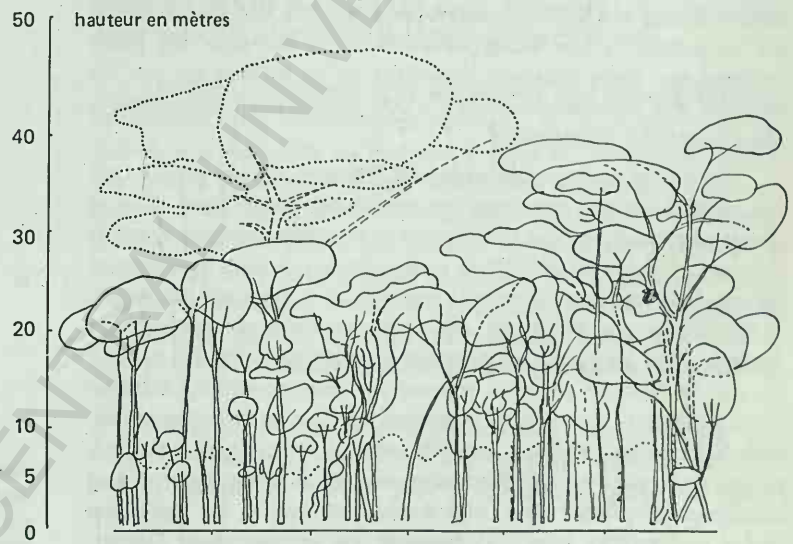
BCU LAUSANNE - UNIVERSITY LIBRARY

Figure 1.4
Répartition des grands biomes : 1) Toundra, 2) Forêt boréale de conifères, 3) Forêt mixte de feuillus et de conifères, 4) Forêts caducifoliées tempérées, 5) Steppes graminéennes, 6) Déserts, 7) Forêts sclérophylles méditerranéennes, 8) Semi-déserts, 9) Savanes et forêts claires caducifoliées tropicales, 10) Forêts ombrophiles tropicales, 11) Ecosystèmes montagnards (zonation complexe)

taille des feuilles qui sont lauriformes, rigides, non dentées et caduques. La sempervirence du feuillage est une conséquence de la régularité des précipitations et de l'absence de saison marquée.

A la différence des forêts tempérées, les forêts hygrophiles tropicales possèdent une stratification complexe et continue de la végétation caractérisée par son importante densité à tous les niveaux, à l'exception de la strate inférieure herbacée (d'où le terme de forêt dense). Une autre particularité de ces biomes forestiers tient en l'abondance des lianes qui grimpent dans les frondaisons et dont la longueur peut excéder 100 mètres. Une autre spécificité propre aux forêts ombrophiles résulte de la présence d'une grande variété de plantes épiphytes favorisées par une hygrométrie élevée et constante. Ces épiphytes, de position taxonomique très diverse (Bryophytes, fougères, orchidées, Aracées, broméliacées etc.) peuvent constituer un revêtement continu à la surface des branches ou du tronc. Elles sont adaptées aux diverses conditions d'éclairement (héliophilie ou sciaphilie) selon la hauteur relative où elles se situent dans la stratification.

Figure 1.4a
Structure verticale d'une forêt ombrophile tropicale de Côte-d'Ivoire. On remarque la stratification complexe de la végétation (les lianes n'ont pas été figurées). D'après Huttel et Berhnard-Reversat, 1975.



A l'opposé, la strate herbacée est clairsemée, adaptée à la très faible luminosité qui règne au niveau du sol et comporte un certain nombre d'espèces végétales parasites. Le faible développement du système racinaire des arbres des forêts ombrophiles tropicales s'oppose à la luxuriance des parties aériennes. On a pu par exemple observer dans une forêt de Côte d'Ivoire que 95 % des racines croissaient dans les premiers 130 cm de profondeur (Huttel et Berhnard-Reversat, 1975). Ceci explique la sensibilité des arbres aux déracinements et la relative fréquence des chablis. En conséquence, la majorité de la biomasse est aérienne (Tableau I).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau I

Importance et répartition des biomasses végétales dans des forêts hygrophiles de Côte d'Ivoire (exprimées en tonnes/ha).

	Forêt de Banco	*Forêt de Yapo*	*Forêt de l'Anguédédou*
Arbres : troncs et branches	360	330	
Rameaux	105	95	
Arbustes : Tiges et rameaux	15	–	240
Lianes : Tiges et rameaux	24	–	
Feuilles : Tiges et rameaux	9	6	2,5
Biomasse aérienne totale	513	–	242,5
Racines	49		48
Biomasse totale	562		290,5

d'après Huttel et Bernhard — Reversat (1975).

On notera aussi l'importance de cette biomasse qui cependant n'est pas nettement supérieure et même là encore comparable à celle caractéristique des forêts primitives tempérées. Le tableau I reflète ce qui correspond à une valeur moyenne de la biomasse des forêts ombrophiles. Nous noterons cependant qu'en certains cas ont été signalées des biomasses excédant 1 000 tonnes par hectare mais il s'agit semble-t-il d'exceptions.

Les forêts ombrophiles tropicales croissent en règle générale sur des terrains anciens constitués par des roches plutoniques. Elles se développent donc sur des sols pauvres en éléments minéraux nutritifs d'autant plus que les conditions pédalogiques qui leurs sont propres favorisent le lessivage. Comme la majorité de la biomasse est épigée, il en résulte que l'essentiel des éléments minéraux nutritifs est contenu dans les parties aériennes de la végétation (fig. 1,4 b). Ceci conduit à faire de sérieuses réserves sur leurs conditions actuelles "d'exploitation" car elles se traduisent par une exportation irréversible d'éléments minéraux nutritifs avec pour corollaire une diminution de fertilité des sols dont les conséquences seront certainement catastrophiques pour leur régénération ultérieure. La faune des forêts ombrophiles tropicales présente une extraordinaire diversité spécifique inégalée par aucune autre biocoenose terrestre. On y rencontre un nombre d'espèces d'Arthropodes, en particulier d'insectes, tout à fait colossal, qui occupent les innombrables minohabitats propres aux différentes strates.

Non seulement les oiseaux, mais aussi les reptiles, les mammifères et même les amphibiens présentent une prédominance de formes arboricoles. La forte hygrométrie atmosphérique explique l'abondance des espèces d'Anoures épigée dont les têtards peuvent dans certains cas se développer dans des nids aériens (*in* Lamotte et Lescure, 1977). L'importance de l'humidité ambiante permet aussi la vie à la surface du sol voire dans les strates arbustives de

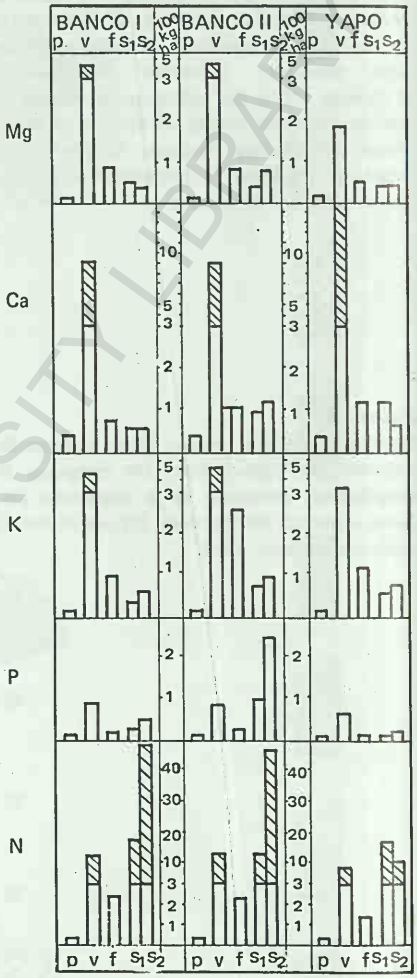


Figure 1.4b
Répartition des éléments minéraux nutritifs entre le sol et la biomasse dans des forêts ombrophiles tropicales de Côte d'Ivoire. D'après Bernhard-Reversat, 1975).

ORSTOM FONDS DOCUMENTAIRE UNIVERSITY LIBRARY

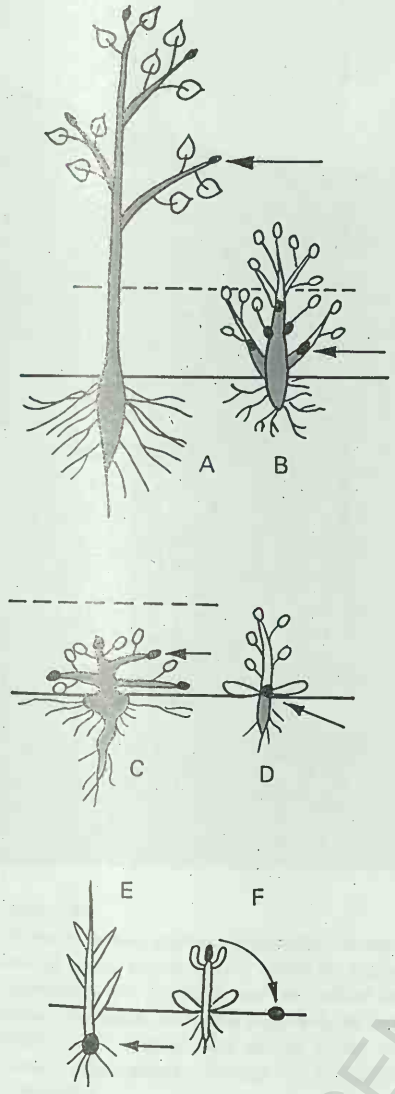


Figure 1.4c
Classification des formes végétales selon Raunkiaer A — Phanérophytes (arbres, arbustes et plantes ligneuses buissonnantes avec des bourgeons à plus de 25 cm au-dessus du sol ; B et C — Chamaephytes (plantes lingeuses avec des bourgeons à moins de 25 cm de la surface du sol) ; D — Hémicryptophytes (plantes vivaces dont la partie bourgeonnante est à la surface du sol) ; E — Géophytes (plantes vivaces avec bulbe souterrain) ; F — Therophytes (plantes annuelles survivant à la saison défavorable seulement sous forme de graines). Les tissus assurant la pérennité du végétal sont figurées en noir, les parties ligneuses en grisé.

planaires et de sangsues, groupes d'invertébrés d'habitat aquatique partout ailleurs dans le monde.

Les forêts ombrophiles atteignent leur maximum d'extension dans une zone comprise entre les 10° de latitude N et S.

Lorsqu'on s'éloigne au-delà de ces limites, la pluviométrie se réduit rapidement et à ces biomes succèdent des *Forêts sèches tropicales* constituées essentiellement par des espèces caducifoliées, qui perdent leurs feuilles pendant la saison sèche, en mélange ou non avec des arbres au feuillage sclérophylle et sempervirent. Le peuplement arboré y est de plus faible taille que dans les forêts ombrophiles. Le nombre d'espèces sempervirentes et la durée de défoliation sont liées à la longueur de la saison aride, la proportion relative d'espèces caducifoliées augmentant avec cette dernière.

Les *savanes* tropicales succèdent aux forêts ombrophiles après un stade de transition progressive marqué par l'existence d'un type de forêt sèche caducifoliée ou de façon brutale, sans stade intermédiaire. Dans d'autres cas, une forêt-galerie prolonge vers les régions plus arides la forêt hygrophile car les conditions édaphiques et hygrométriques propres aux rives des cours d'eaux sont plus favorables, les plateaux étant occupés par des formations de savanes.

Les types physionomiques des savanes sont évidemment liés à l'abondance des précipitations. Celles-ci se succèdent avec une remarquable régularité du Sud vers le Nord en Afrique occidentale. Les savanes guinéennes, encore dénommées savanes arborées, croissent là où les pluies annuelles excèdent 1 200 mm. On y rencontre diverses espèces d'arbres qui forment un peuplement dispersé au milieu d'un tapis herbacé dense et continu. Au delà s'observent des savanes soudaniennes, encore dites savanes arbustives caractérisées par diverses espèces ligneuses d'arbustes résistants aux feux de brousse qui les parcourent chaque année détruisant le tapis herbacé.

Enfin, les savanes sahéliennes, d'aspect steppique sont plus pauvres en végétaux ligneux et constituent un stade de transition avec le désert. Les épineux sont prédominants parmi les espèces arbustives.

De façon générale, l'abondance des arbustes et autres végétaux ligneux décroît dans les savanes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. L'essentiel du tapis végétal est constitué par diverses espèces de graminées vivaces dépassant souvent un mètre de hauteur à maturité. En Afrique, le peuplement graminéen est surtout constitué par les genres *Andropogon, Themeda, Imperata* et *Pennisetum.* L'abondance des plantes herbacées en saison humide permet la multiplication d'ongulés de grande taille : zèbres, buffles, antilopes, gazelles et autres herbivores. La biomasse mammalienne y atteint des valeurs inégalées ; en aucune région du monde on ne rencontre une telle concentration en grands mammifères.

ECOLOGY CENTRE LIBRARY

La physionomie du couvert végétal des savanes tropicales a été profondément modifiée par la pratique de l'incendie saisonnier, allumé chaque année au cours de la période aride, laquelle est très répandue parmi les peuples de pasteurs ou les agriculteurs sédentaires qui vivent dans ces zones (cf. Chap. VIII, p. 466). En Afrique et dans toute l'Asie tropicale, cette action anthropique a provoqué l'extension de savanes secondaires au détriment de la forêt. C'est par exemple le cas de la savane guinéenne de Lamto en Côte d'Ivoire où les travaux de l'équipe Lamotte (1967 et suiv.) ont montré que la mise hors feu se traduit rapidement par l'apparition d'un stade transitionnel vers la forêt dense secondaire. La défriche peut aussi substituer à un climax forestier des savanes secondaires après abandon des cultures. Celles-ci, en Afrique, se caractérisent par la présence d'une graminée de grande taille, *Pennisetum purpureum,* dite "herbe à éléphant".

Les *déserts,* dont le maximum d'extension se situe au niveau des tropiques, succèdent aux savanes sans transition nette. Ils se caractérisent par des précipitations réduites, inférieures à 200 mm par an, et un degré d'aridité d'autant plus élevé que les pluies y sont plus rares et plus rares et plus irrégulières. Le couvert végétal y est discontinu, représenté par des plantes vivaces, ligneuses, xérophytes et des annuelles (thérophytes) à période végétative très brève. Les parties souterraines des végétaux sont extrêmement développées, adaptation en rapport avec les conditions climatiques qui caractérisent les biotopes désertiques : sécheresse extrême, eurythermie étendue, etc.

La flore désertique comporte une grande variété d'adaptations à l'aridité. Toute une série de plantes vivaces à organes aériens permanents croissent dans les déserts, même là où les précipitations annuelles sont inférieures à 50 mm ! La réduction du feuillage, sa xéromorphie, en certains cas même l'aphyllie totale (*Fouquiera* sp. des déserts sonoriens p.e), représentent autant d'adaptations destinées à minimiser les pertes d'eau par évapotranspiration. Elles se rencontre de façon quasi-systématique dans les peuplements végétaux déserticoles. La succulence, qui atteint son apogée évolutive chez les cactées, diverses crassulacées et chez certaines euphorbes africaines constitue une autre forme de résistance à l'aridité des végétaux croissant dans des zones désertiques. Elle se caractérise par l'accumulation d'importantes réserves d'eau tissulaires et par une réduction extrême des pertes par transpiration.

Le système racinaire superficiel, très étendu, propre à ces plantes, nécessite toutefois la présence d'édaphisme ou l'existence de précipitations relativement régulières ce qui les exclue des zones hyperarides.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

Figure 1.5a
Cactées et autres plantes xérophiles croissant dans les zones semi-arides du désert de Mojave (Californie). On remarque sur ce cliché des Cactus de cholla, (Opuntia bigelovii), *au port dressé, et au second plan sur la crête, une liliacée arborescente* (Yucca *sp.*). (Cliché F. Ramade).

Figure 1,5b
Arbustes xérophytiques acaules (Fouquiera arizonica) *propres aux déserts sonoriens chauds. (Mojave county, Arizona). Cliché F. Ramade.*

BCU IASI / CENTRAL LIBRARY

La vie animale déserticole comporte de nombreuses espèces de reptiles et de rongeurs adaptés à l'absence d'eau qui se satisfont de l'apport hydrique lié à la nourriture. Même les grands herbivores propres aux zoocoenoses désertiques présentent une certaine capacité de résistance au manque d'eau. Toutefois, ils ne peuvent se passer de boire à la différence des reptiles et des rongeurs. Le record de résistance à la soif est sans doute détenu par une antilope saharienne, *Addax nasomaculatus,* qui peut se contenter de nourriture sèche pendant une durée supérieure à celle tolérée par le dromadaire.

Les invertébrés déserticoles possèdent aussi de remarquables adaptations physiologiques au manque d'eau. De plus, ils possèdent un niveau de sténothermie très élevé. *L'Adesmia metallica,* ténébrionide du Sahara, présente p.e un thermopréférendum compris entre 48 et 50° C !

La classification écologique des déserts se fonde sur leur degré de xéricité (Fig. 1.5 d). L'indice de Thornthwaite donne une estimation quantitative précise de leur degré de xéricité (*in* Lemée, 1967). Il a pour expression $Ih = \frac{100e - 60d}{ETp}$ où ETp est l'évapotranspiration potentielle, e l'eau de précipitation excédentaire en période humide (en fixant à 100 mm la capacité de rétention des sols), d le déficit en période sèche.

On distingue des semi-déserts, correspondant à des zones à climat semi-aride (indice de Thornthwaite compris entre -20 et -40), des déserts vrais où cet indice est inférieur à -40), des déserts vrais où cet indice est inférieur à -40 (précipitations en règle générale inférieures à 80 mm par an). Enfin, dans les zones à climathyperaride (indice de Thornwaite inférieur à -57), les pluies sont aléatoires plus de douze mois sans précipitations pouvant être observés ! Selon certains écologistes, le terme de désert vrai devrait être réservé de façon exclusive aux zones à climat hyperaride, d'autres comme Meigs l'étendent à l'ensemble des zones arides et hyperarides définies par un indice de Thornthwaite inférieur à -40.

Les vrais déserts se rencontrent essentiellement dans les zones subtropicales. La biomasse totale y est fort réduite, tout au plus égale à 20 t/ha (essentiellement souterraine) et en règle générale nettement inférieure à cette valeur.

Dans les zones hyperarides, la végétation ne croît que si les précipitations moyennes excèdent 20 mm/an. Entre 2 et 5 cm par an, les végétaux sont très espacés, la diversité spécifique faible, la vie animale rare.

Lorsque l'indice de Thornthwaite s'approche de -40, la richesse floristique et faunistique s'élève rapidement de sorte que dans les semi-déserts peuvent s'observer des diversités spécifiques assez élevées.

BOCHASCA / CET - U. LIBRARY

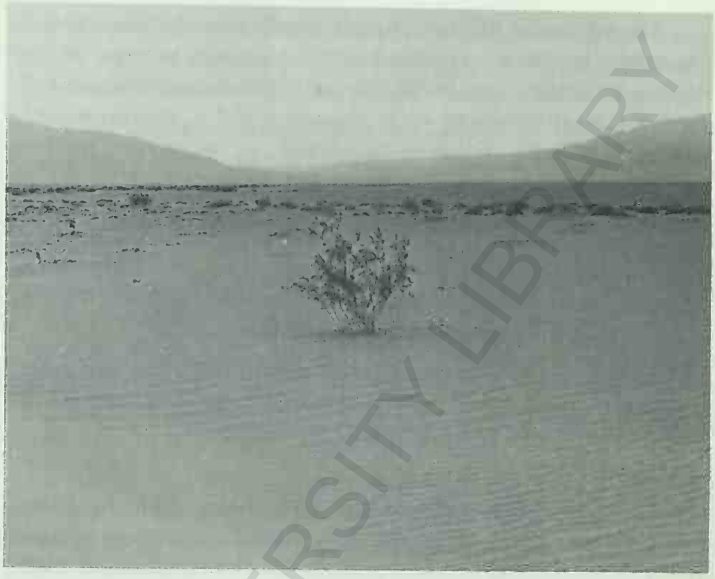
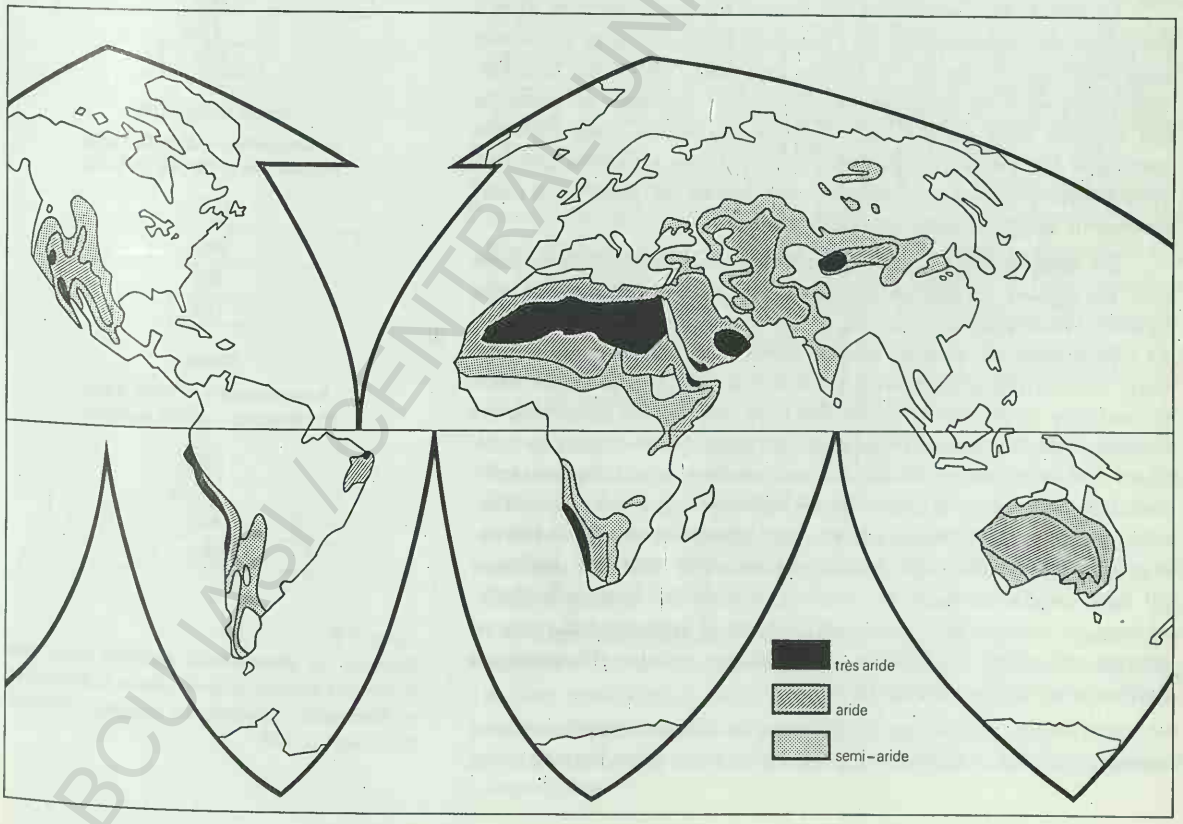


Fig 1,5 c

Dunes de sable vif dans la Death-Valley (Californie). Malgré l'hyperaridité de cette zone, quelques végétaux particulièrement xérophiles arrivent à croître. On remarque un plant de Creosote (Larraea divaricata) *et des chénopodiacées halophiles. Cliché F. Ramade.*

Fig. 1.5 d

Répartition des zones arides dans le monde. D'après Meigs, Review of research on arid zones hydrobiology, *Unesco, 1953*



BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tel est le cas des écosystèmes désertiques dits sonoriens de l'Amérique du Nord subtropicale. On y rencontre un tapis végétal relativement dense caractérisé par la prédominance d'espèces ligneuses (*Larrea divaricata* — "le créosote bush" — diverses liliacées arbustives telles les *Yucca* et *Dasylirion* — "le Joshua Tree") et une grande abondance de cactées. C'est d'ailleurs dans les parties méridionales des déserts sonoriens — Sud de l'Arizona et NO du Mexique — que croît le saguaro ou cierge géant (*Carnegia gigantea*) cactée gigantesque dont certains individus peuvent dépasser 25 m de hauteur à maturité. Les Agave et les *Opuntia* constituent d'autres végétaux originaires des déserts sonoriens.

Au-delà des 30° de latitude, la pluviométrie remonte à nouveau, de sorte que les communautés se diversifient, et la quantité de matière vivante qu'elles renferment croît de nouveau.

Les *écosystèmes méditerranéens* très variés et assez complexes, correspondent à des zones tempérées chaudes marquées par une période plus ou moins longue (mais excédant souvent quatre mois) de sécheresse estivale.

Les précipitations, souvent brutales, atteignent leur maximum aux équinoxes de printemps et surtout d'automne.

Le maximum d'extension des biomes méditerranéens se situe à l'emplacement approximatif de l'ancienne Mésogée. Ils se succèdent sans interruption depuis le Maroc jusqu'aux flancs du Caucase. Importants aussi en Australie méridionale, ils occupent en revanche des surfaces assez faibles dans le Nouveau Monde. Leur diversité spécifique est élevée. En revanche, leur biomasse de même que leur productivité primaire sont relativement faibles par suite de la quasi absence de pluies pendant la période estivale.

On discerne deux grands types de communautés biocœnotiques dans ces régions. Le premier est constitué par des forêts *sclérophylles* (chênes essentiellement) ou des *forêts sempervirentes de conifères.* La dégradation du couvert végétal climacique par l'homme semble avoir favorisé l'extension des boisements de pin dans la région méditerranéenne et de biomes de second type, formations buissonnantes connues sous le nom de maquis ou garrigues. Celles-ci sont caractérisées par la présence de nombreuses espèces arbustives sempervirentes et xérophiles et d'une strate herbacée clairsemée. Cette dernière est surtout constituée par diverses plantes du groupe des hémicryptophytes et des géophytes qui représentent l'élément dominant du tapis végétal herbacé. On peut rapprocher des maquis méditerranéens le "chaparral", formation à végétaux sclérophylles riche en espèces arbustives qui s'étend sur plusieurs millions d'hectares en Californie et dans le nord du Mexique.

Les régions tempérées, situées sous de moyennes latitudes, sont occupées par deux biomes majeurs. Partout où la pluviométrie est

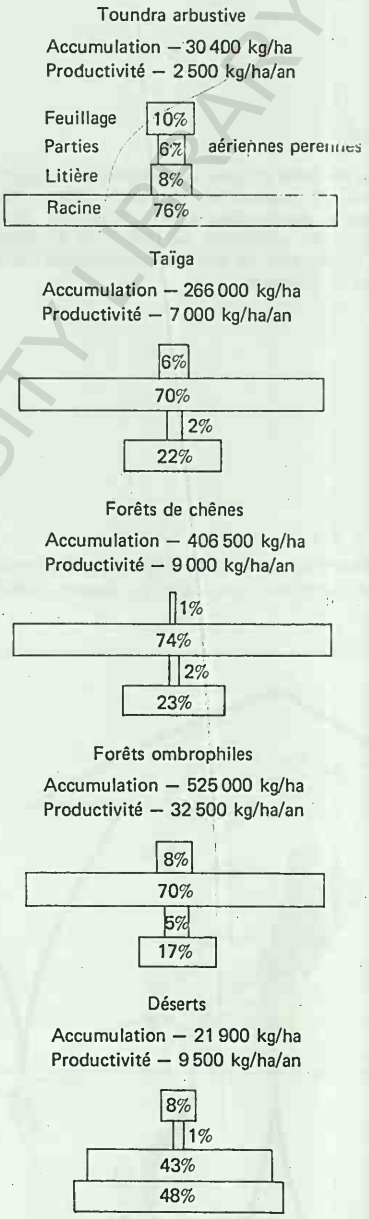


Figure 1.6
Biomasse et productivité primaire nette des principaux biomes. D'après Rodin et Bazilevich in *Kormondy* Concepts of Ecology, *Prentice Hall, 1969, p. 128*

BOSTON UNIVERSITY LIBRARY

abondante s'étendent d'immenses écosystèmes forestiers caractérisés par la présence d'arbres à feuilles caduques, ou par des peuplements mixtes de feuillus et de conifères à leur frange septentrionale.

Ces biomes forestiers sont remplacés par des écosystèmes steppiques lorsque les précipitations deviennent insuffisantes pour permettre la croissance des arbres.

Ces biomes de *forêts feuillues tempérées et caducifoliées* recouvraient autrefois toute l'Europe tempérée (Scandinavie méridionale incluse) depuis l'Atlantique jusqu'au versant sibérien de l'Oural, la Chine septentrionale et centrale et la partie du continent nord-américain située à l'est du 100^{e} parallèle jusqu'à la latitude du Saint-Laurent. De tels biomes sont en revanche quasi inexistants dans l'hémisphère austral (sauf en Australie et en Nouvelle Zélande) par suite de la rareté des terres émergées au-delà de 40° S.

En Europe, ce biome est représenté par des forêts de chênes ou de hêtres selon les variations locales d'hygrométrie atmosphérique, auxquelles se mêlent des espèces arborées plus rares (tilleuls, érables, etc.). La diversité spécifique des forêts feuillues européennes est assez grande. Leur composition floristique, complexe, varie selon la nature du sol. En Amérique du Nord, les forêts caducifoliées comportent un nombre d'espèces arborées nettement plus élevé qu'en Europe. Il en existe plusieurs types : forêts mixtes de hêtre et d'érable à sucre à sa limite septentrionale, de chênes et de châtaigniers à l'Est au Sud-Est, de chênes et de noyers d'Amérique ou "Hickory" (genre *Carya*) au Sud-Ouest et à l'Ouest des Appalaches. A côté de ces espèces dominantes croissent divers autres arbres *Liquidambar* sp., Tulipiers d'Amérique (*Liriodendron* sp) etc.

A maturité, les arbres des forêts caducifoliées tempérées peuvent excéder 40 m s'ils ne sont pas exploités, cas tout à fait exceptionnel de nos jours. Il n'existe en effet plus guère de tels boisements à l'état vierge. Certaines d'entre elles, comme la forêt tempérée feuillue du N.E de la Chine ont été complètement détruites par l'homme au début de la période historique et les rares vestiges profondément altérés qui en subsistent ne nous permettent pas d'établir de façon précise sa composition floristique originale.

La forêt caducifoliée tempérée comporte une importante stratification arbustive et herbacée. Les espèces composant ces strates possèdent une période végétative courte, adaptée aux conditions particulières du sous-bois qui est rapidement plongé dans la pénombre au début de la belle saison, par suite du développement du feuillage dans la frondaison.

La faune des forêts caducifoliées est assez riche malgré la présence d'un hiver rigoureux impliquant un hivernage et une migration, et une stratification nettement plus faible que dans les forêts tropicales laquelle jointe au nombre plus restreint d'espèce végétale qui y croisse réduisent d'autant le nombre de niches écologiques disponibles.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La faune mammalienne, à l'opposé des forêts ombrophiles tropicales vit au sol. On dénombre jusqu'à 500 rongeurs terricoles par hectare, des insectivores fouisseurs, divers carnivores dont le renard, le blaireau et divers ours. Toutefois, certains mammifères arboricoles s'y rencontrent (lynx, chats sauvages, mustelidés, divers écureuils (*Sciurus, Tamia* sp. d'Amérique du Nord, etc.).

Les cervidés constituent un groupe d'herbivores de grande taille initialement inféodé à de telles forêts. Le cerf d'Europe (*Cervus elaphus*) constituant le représentant le plus spectaculaire de cette famille. Leur densité optimale est nécessairement faible compte tenu de la faible productivité de la strate herbacée dont ils se nourrissent. On compte en moyenne 2 cerfs/100 hectares et 7 à 15 chevreuils pour une même surface.

Les oiseaux se répartissent de façon équilibrée entre les différentes strates : 15 % nichent au sol, 25 % dans la strate arbustive, 31 % sur ou dans les troncs, 29 % dans la canopée (dans une chênaie tchèque, *nec* Lemée, 1967).

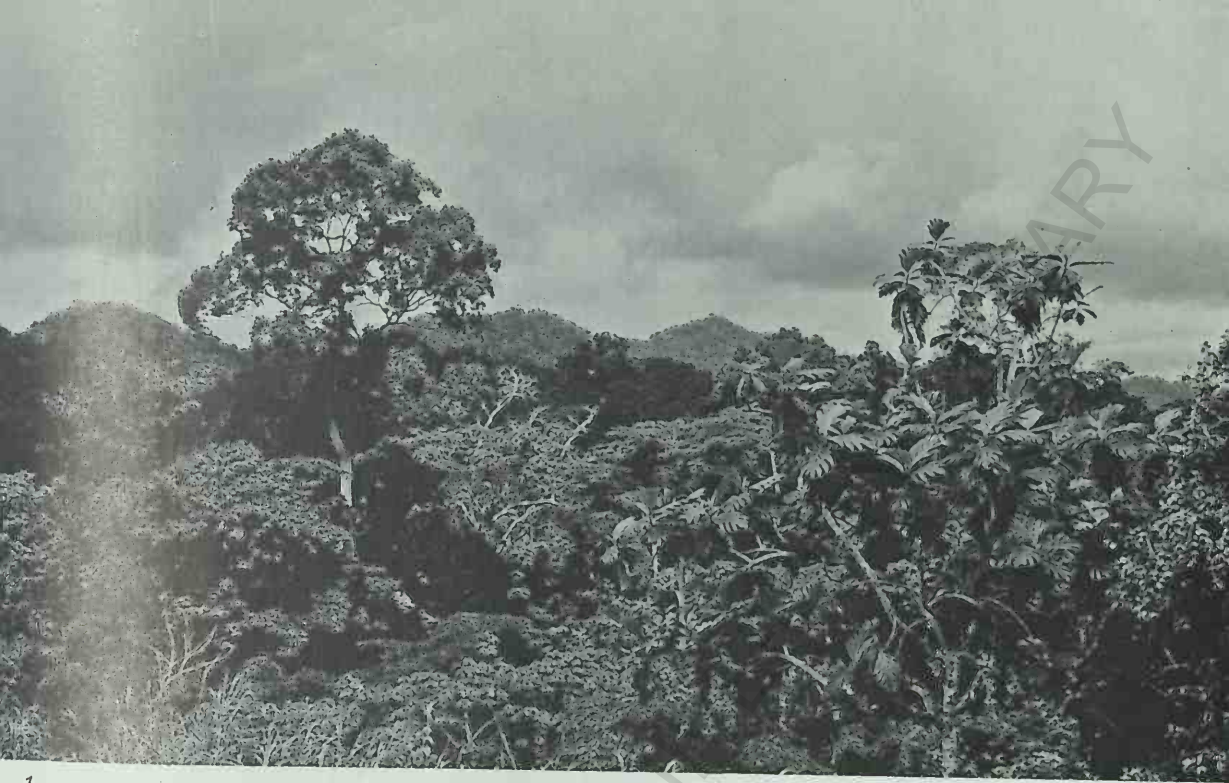
Le peuplement d'insectes phyllophages (chenilles défoliatrices en particulier) et xylophages (scolytides p.e) y est très important. Enfin, le rôle de la pédofaune revêt une importance fondamentale dans la décomposition de la litière (collemboles et acariens) et dans la formation d'un humus abondant et bien réparti (Müll) dans les couches superficielles du sol. La biomasse des vers de terre (lumbricidés, megascolecidés, *Enchytreidae*), dont le rôle est essentiel dans la création de l'humus, atteint des valeurs très élevées, de l'ordre de 600 kg/ha. Dans des cas exceptionnels elle peut même dépasser 1 t/ha.

La forêt caducifoliée tempérée renferme une biomasse fort élevée mais cependant inférieure à celle des biomes tropicaux homologues. Ainsi, la chênaie peut excéder 400 tonnes de matière vivante par hectare alors que la forêt ombrophile tropicale présenterait en moyenne une accumulation de 500 t/ha.

Les *forêts pluvieuses* (= ombrophiles) tempérées ne couvrent à l'heure actuelle qu'une surface assez faible par rapport à celle propre aux autres biomes forestiers. Elles ne se rencontrent guère en effet qu'en quatre régions du globe : la côte Nord-Ouest des Etats-Unis et du Canada depuis le Nord de la Californie jusqu'à la partie extrême Sud de l'Alaska, dans le Sud-Est de l'Australie, dans la zone littorale de l'Ile du Sud en Nouvelle Zélande, enfin sur le littoral du Chili dans la partie centrale de cet état.

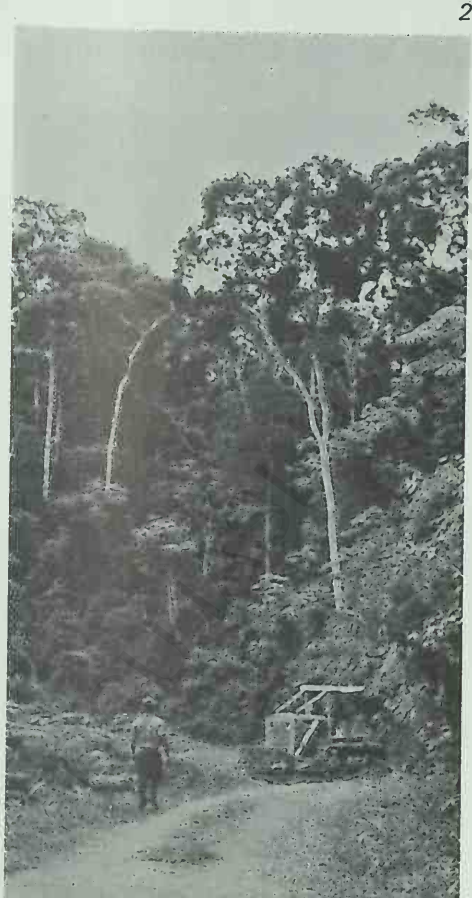
Ces forêts sont constituées d'arbres gigantesques atteignant en moyenne 70 à 80 mètres de haut et pouvant même dépasser les cent mètres à maturité. Il s'agit dans la plupart des cas de boisements de conifères. Toutefois, ils peuvent aussi comporter des hêtres australs

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY



1

2



3

Planche 1

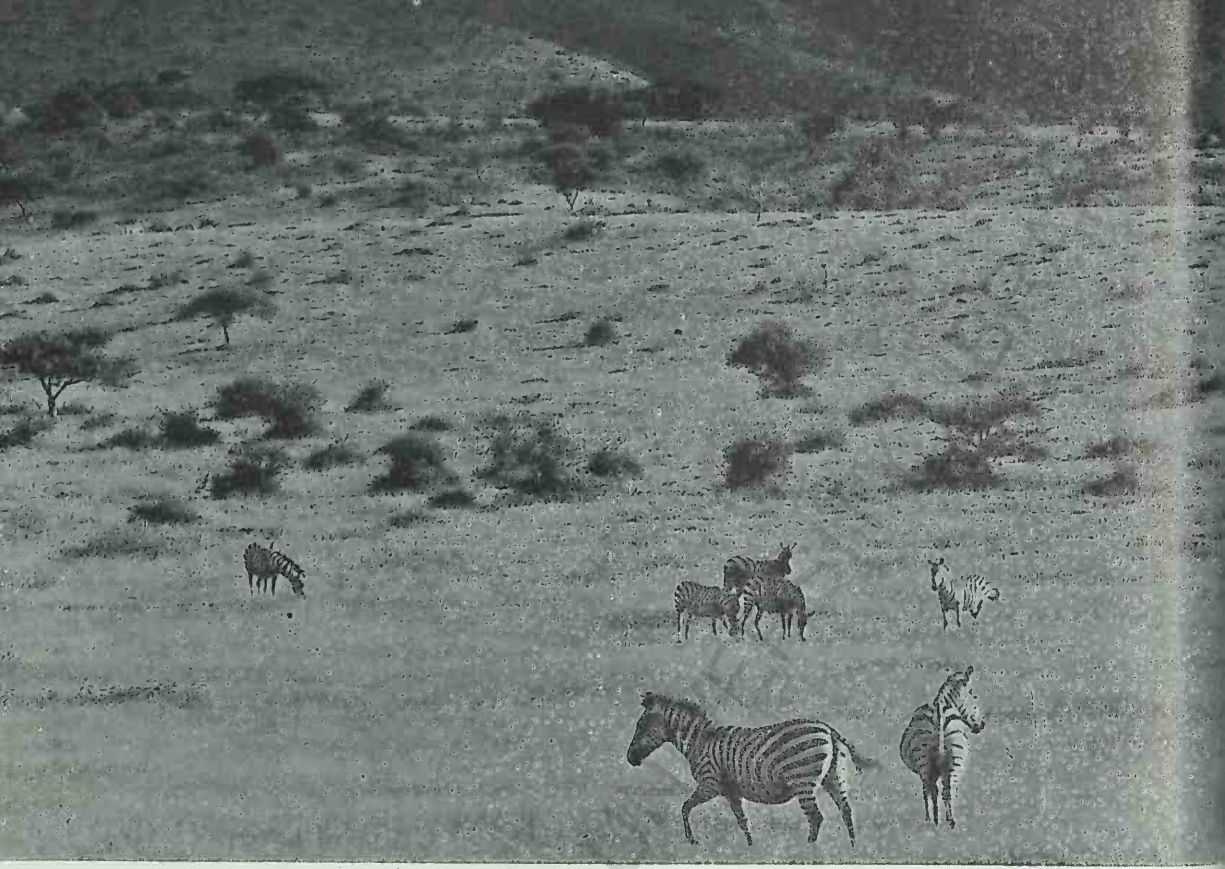
Forêts ombrophiles tropicales. Malgré leur immense étendue, ces forêts qui constituent les plus riches et les plus diversifiées des biomes continentaux, sont aujourd'hui en voie de régression accélérée du fait de l'homme.

1) Vue panoramique de la forêt vierge congolaise

2) Clairière d'abattage. Le bulldozer visible sur ce cliché, symbolise les méthodes actuelles de "mise en valeur" des forêts tropicales. Remarquer aussi la stratification complexe de la végétation. (clichés M. Raabe)

3) Plantations de thé après défrichage de forêt vierge dans les montagnes de Malaisie. La végétation primitive est encore visible sur les crêtes. Les sols ainsi mis à nu par ces cultures industrielles sont particulièrement

1



2

3

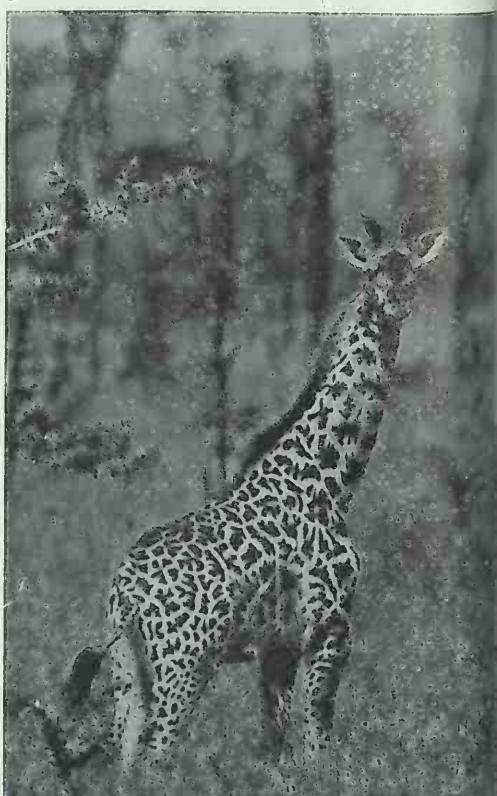


Planche II

Savanes en Afrique orientale (Parc National du Serengeti, Tanzanie)

1) Troupeau de zèbres dans une savane arbustive

2) Aspect général d'une savane arborée à Acacia, *biotope de prédilection de la girafe*

*3) Girafe masaï dans un bosquet d'*Acacia *(clichés A. Kerneis)*

Planche III

Biome désertique (Sahara septentrional)

1) Formations sablonneuses en bordure du Grand Erg occidental

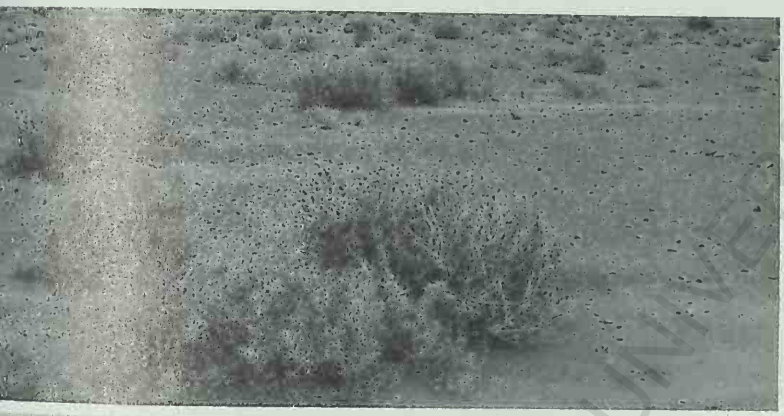
2) Végétation sur un reg ensablé : on remarque diverses graminées et salsolacées vivaces (Haloxylon), *qui subsistent grâce à leur système racinaire puissant et profond.*

3) Sebkah pierreuse avec peuplement d'acacia

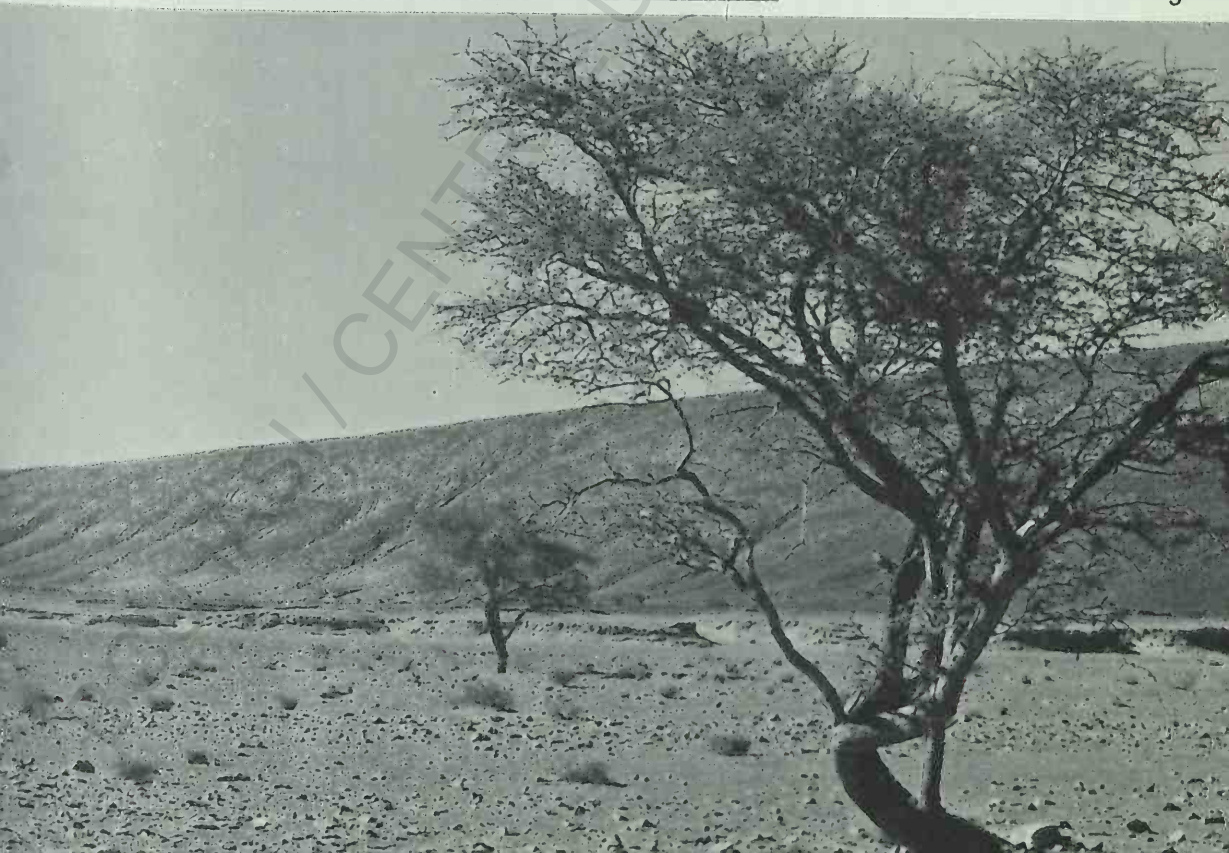
(clichés J.M. Pinet)

1

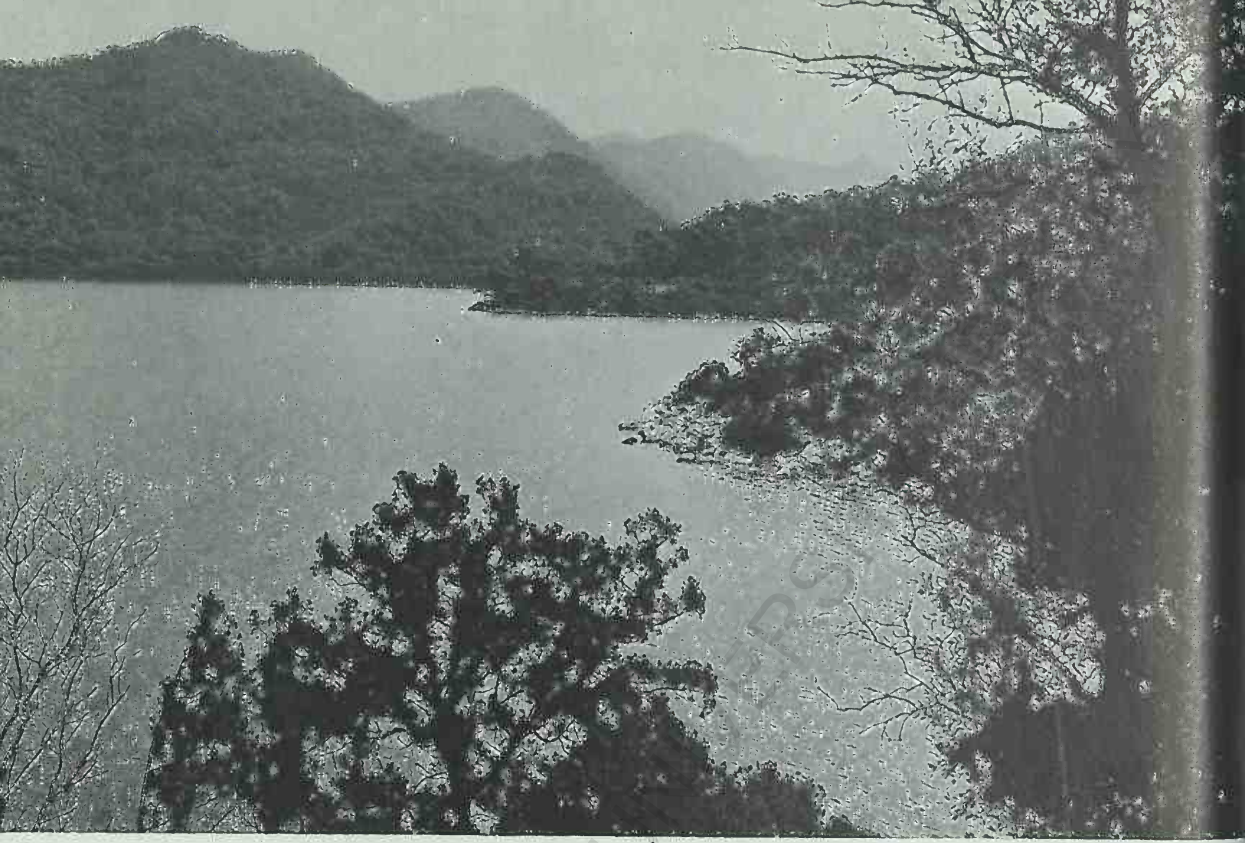
2



3

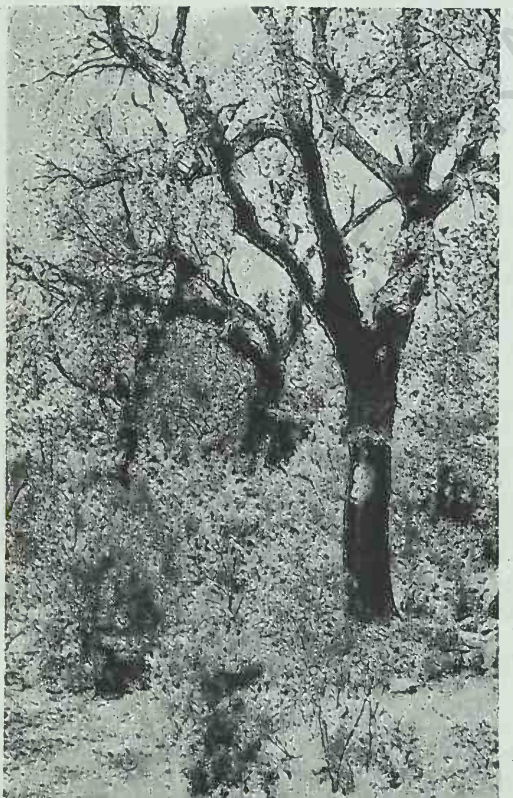


U / CENTRE UNIVERSITY LIBRARY



1

3



2

1

Planche V

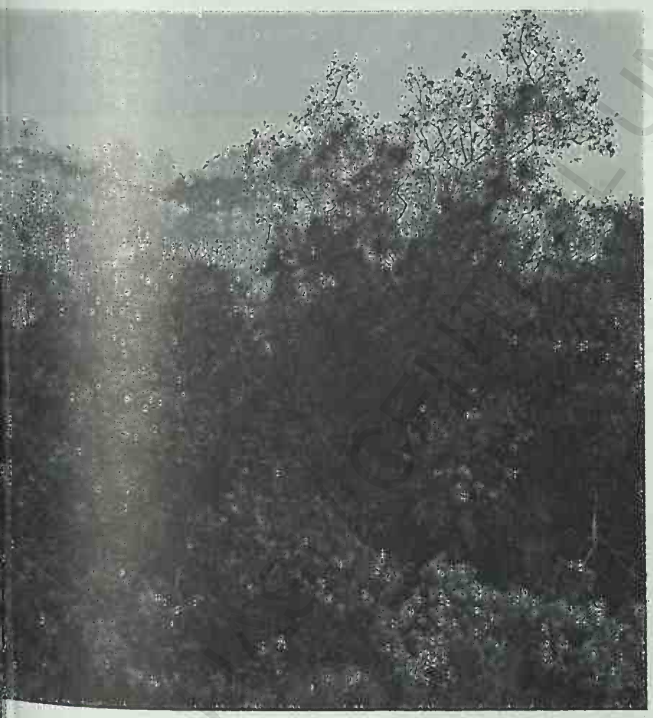
Formations végétales xérophiles de la région méditerranéenne (clichés F. Ramade)

1) Forêt secondaire de pins d'Alep (Pinus halepensis) *dans le Massif d'Allauch près de Marseille. L'extension de cette espèce, très xérophile, a été favorisée par l'action de l'homme. Elle s'est substituée aux forêts primitives de chênes qui recouvraient ces régions aux époques protohistoriques, progressivement anéanties par le fer et par le feu*

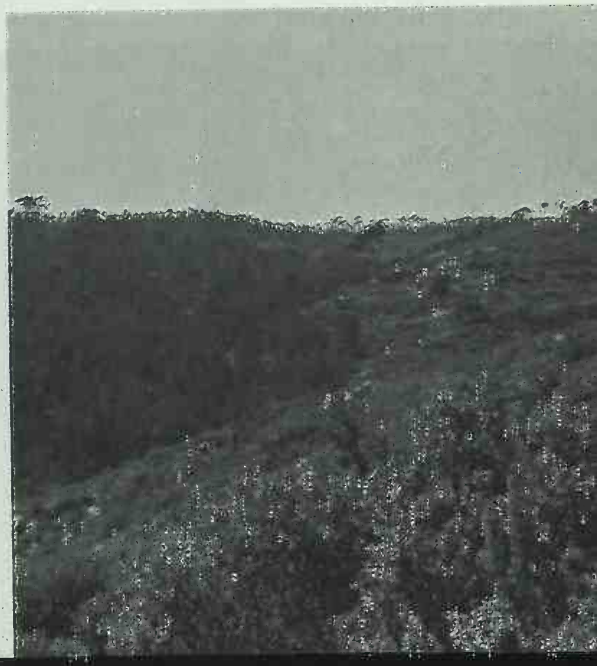
2) Vue de détail du couvert végétal d'une garrigue provençale. Ces formations constituent un stade de dégradation des forêts climaciques de chênes sur sol calcaire. Le kermès (Quercus coccifera), *arbuste de grande taille sur ce cliché en constitue l'espèce dominante avec les cistes cotonneux aux feuilles larges (au premier plan, à droite du cliché) et le buplèvre* (Bupleurum fruticosum), *grande ombellifère arbustive (à gauche)*

3) Effets de l'incendie sur le couvert végétal méditerranéen. Une diagonale divise ce cliché en deux régions. Au premier plan et à droite, on remarque une garrigue à chênes-kermès qui s'est installée après un incendie en 1968. Au second plan et à gauche, on distingue une forêt secondaire de pins d'Alep, qui s'est reconstituée après un premier incendie en 1943. Au centre du cliché, on remarque un arbre centenaire qui a survécu à plusieurs feux et joué, après chacun d'eux, le rôle de porte-graine, favorisant ainsi la reprise de la pinède

2



3



← *Planche IV*

Forêts latifoliées sclérophylles méditerranéennes

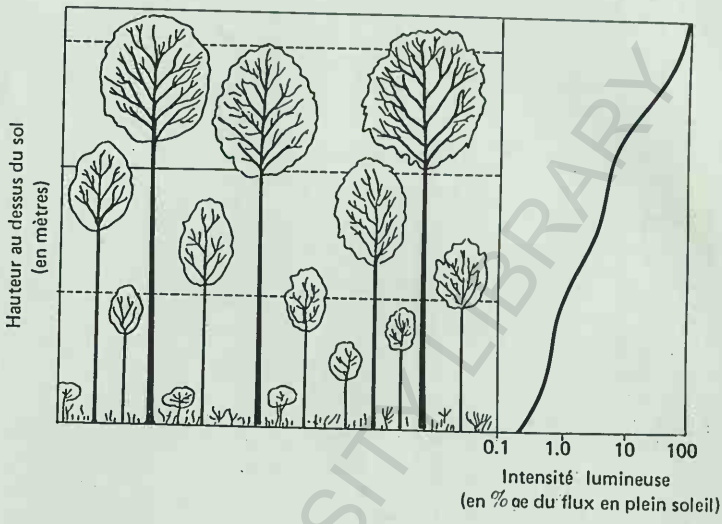
1) Le Parc National yougoslave de Miljet (Croatie) abrite un des plus beaux restes de la chênaie sclérophylle méditerranéenne (cliché M. Keraudren — Aymonin)

2) Sous-bois dans la forêt d'Yeuse (Quercus ilex) *des gorges d'Héric, en Languedoc*

3) Forêt de chênes lièges (Quercus suber) *dans l'Esterel (clichés G. Aymonin)*

Planche VI
Forêt caducifoliée tempérée
1) Une vue du sous-bois dans la hêtraie de Villers-Cotterêts. Remarquez la faible stratification. (Cliché P. Vallée)
2) Le cerf d'Europe (Cervus elaphus), *initialement inféodé aux forêts caducifoliées tempérées, subsiste aujourd'hui en nombre relativement important dans ce biome dont il demeure le plus grand herbivore vivant actuel après la quasi disparition du bison d'Europe. (Cliché I. Földi)*

Figure 1.6a
Influence de la stratification sur l'intensité lumineuse aux diverses hauteurs dans une forêt caducifoliée tempérée. On constate que le flux solaire au sol n'excède pas quelques millièmes seulement de son intensité à l'extérieur du couvert végétal. Dans ces conditions, les strates inférieures (arbustives, herbacées et muscinales) ne comportent que des espèces sciaphiles dont le système photosynthétique donne son optimum de rendement sous de faibles luminosités ou des végétaux présentant une très brève période d'activité au printemps, avant que le feuillage des arbres ne se développe (d'après Whittaker, 1975).



(*Nothofagus* sp.) au Chili et en Nouvelle Zélande. Quant à la forêt pluvieuse d'Australie méridionale, elle est constituée par une seule espèce d'arbre dominant l'*Eucalyptus regnans* lequel représente avec le *Sequoia sempervirens* (Redwood géant) des forêts ombrophiles de Californie et de l'Oregon le plus gigantesque végétal existant à l'heure actuelle (on a signalé dans un cas comme dans l'autre des sujets dépassant à maturité 125 m de haut !) (fig. 1.6 b).

La biomasse sur pied y atteint des valeurs inégalées partout ailleurs dans le monde. Près de 2 000 t/ha dans la forêt vierge ombrophile de la péninsule d'Olympic dans l'état de Washington (fig. 1.6 c).

Ces forêts exigent pour croître la conjonction d'une pluviométrie élevée, supérieure à 2 m/an, et répartie de façon régulière tout au long de l'année (1).

La diversité spécifique de la strate arborée est faible dans les forêts pluvieuses tempérées. Le peuplement dominant peut même être monospécifique dans les forêts de "Redwoods" ou d'eucalyptus australien. Trois espèces caractérisent celles du Chili et de Nouvelle Zélande (*Nothofagus, Agathis* et *Podocarpus*). Dans les forêts ombrophiles de la péninsule d'Olympic, on dénombre quatre espèces : le sapin Sitka (*Picea sitchensis*), le Douglas (*Pseudotsuga menziezii*), l'Hemlock (*Tsuga heterophylla*), et le "Western red cedar", *Thuya plicata.*

Les strates arbustives et herbacées comportent à l'opposé un grand nombre d'espèces. Les "arbustes" dont certains seraient ailleurs considérés comme des arbres eu égard à leur taille, appartiennent à diverses familles de dicotylédones. Au sol et sur les troncs d'arbres abattus croissent une multitude de bryophytes, des lycopodes, des sélaginelles et des fougères dont certaines, comme le *Polysticum munitum* peuvent être de grande taille. Enfin, la forte

(1) Les forêts de Redwoods géants de la côte Pacifique de l'Oregon et de Californie ne peuvent se maintenir pendant la saison sèche estivale que grâce à la présence d'un brouillard quasi permanent qui permet au cours de cette période défavorable une hydratation directe du feuillage. Par ailleurs, la forte hygrométrie atmosphérique qui en résulte ralentit de surcroît l'évapotranspiration après dissipation de la rosée.

BCU - SI CENTRALE UNIVERSITAIRE LIBRARY

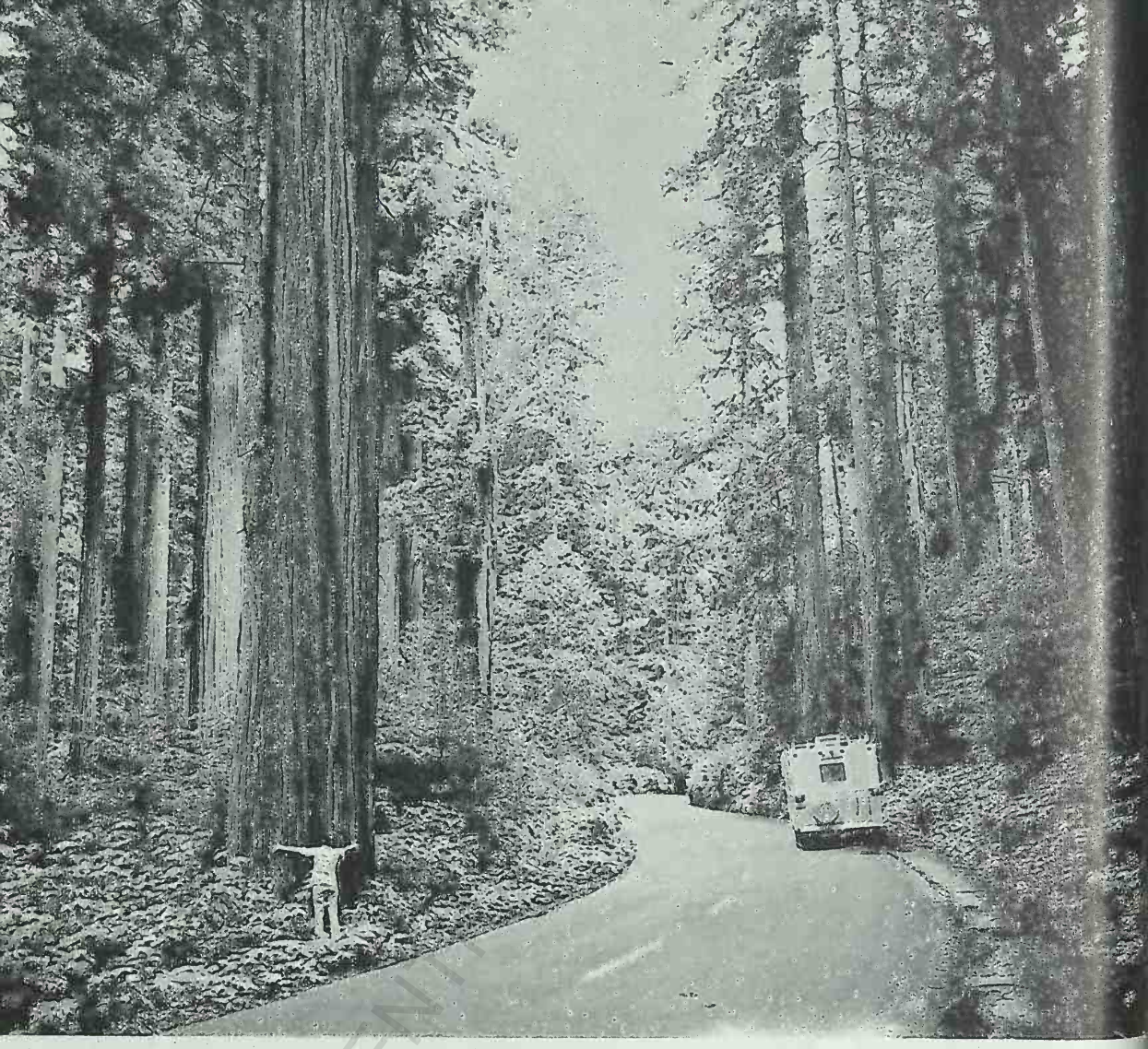


Figure 1.6b
Forêt pluvieuse ombrophile de conifère : Sequoia sempervirens *dans le Parc National des Redwoods (Del Norte, Californie). (cliché F. Ramade).*

hygrométrie atmosphérique favorise le développement de cryptogames épiphytes : mousses et lichens, qui forment un manchon continu à la surface des troncs et des branches.

L'avifaune est abondante dans les forêts tempérées pluvieuses de conifères : on dénombre 240 espèces dans la seule partie forestière du Parc National d'Olympic !

Dans les zones tempérées, où les précipitations sont trop faibles pour permettre la croissance des arbres, la forêt cède la place à des *steppes* qui recouvrent d'énormes surfaces dans l'hémisphère boréal. La "prairie" nord-américaine constitue un excellent exemple de ce biome caractérisé par la prédominance du tapis graminéen.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 1,6 c

La forêt de Hoh, dans le parc national d'Olympic (Washington, Etats-Unis) est une forêt pluvieuse tempérée de conifères croissant sous un climat océanique caractérisé par d'abondantes précipitations (plus de 4 m par an) reparties sur l'ensemble de l'année. Remarquez sur le cliché l'abondance des fougères et des épiphytes. Cliché F. Ramade.

Les sols de steppes présentent de grandes différences avec ceux des forêts tempérées établies sous les mêmes latitudes et sur un même substrat géologique. Ils sont beaucoup plus riches en humus que les sols forestiers correspondants ; en effet, par suite de la brièveté de la vie végétative chez les plantes herbacées, il se produit une importante accumulation de matières organiques, de sorte que l'humification prend le pas sur la minéralisation. De plus, par suite du climat, l'évaporation est supérieure aux précipitations, ce qui se traduit par l'absence de lessivage et de dépôt de sels minéraux – en particulier calcium et potassium – dans les couches superficielles. Il n'est pas étonnant, dans de telles conditions, que certains sols steppiques comme les Tchernozem (terres noires d'Europe orientale et d'Amérique du nord) figurent parmi les plus fertiles du globe.

La végétation des steppes est caractérisée par la prédominance du tapis graminéen ([7]). Celui-ci est constitué par des espèces vivaces pourvues d'un appareil racinaire profond et très ramifié. Celle-ci peuvent avoir un port en touffe (*Stipa* p.e) ou s'étendre en surface par émission de stolons (*Agropyron*). Lorsque les précipitations deviennent trop faibles, les thérophytes annuelles peuvent devenir prépondérantes (Fig. 1.5a).

Malgré la présence d'une seule strate végétale, la diversité spécifique des steppes est très élevée, en particulier, on note l'abondance des espèces de composées et de légumineuses.

Les steppes tempérées, autrefois peuplées de grands herbivores, ont été de longue date utilisées par l'homme soit pour le pâturage, soit pour la culture des céréales dans les zones où les précipitations le permettent. La surexploitation des sols steppiques à des fins agricoles s'est, hélas, souvent traduite par la dégradation irréversible de ces éco-systèmes et leur transformation en déserts créés par l'homme.

La faune mammalienne comporte un grand nombre d'espèces de rongeurs terricoles qui pullulaient avant que les hommes ne défrichent les sols steppiques : chiens de prairie nord-américains (*Cynomys* sp.) et Sousliks (*Citellus suslicus*) d'eurosibérie constituaient les espèces dominantes. Par ailleurs, les steppes tempérées étaient autrefois le biotope de prédilection pour d'immenses troupeaux de grands herbivoires : bisons et antilopes pronghorn en Amérique du Nord, chevaux, ânes et antilopes saïga en Eurasie. Des formes écologiques équivalentes se rencontraient dans d'autres continents : kangourous géants (*macropus rufus*) d'Australie, zèbres et antilopes damalisques en Afrique du sud tempérée.

La biomasse végétale des steppes dépend beaucoup de précipitations moyennes, elle varie de 7 à 50 t/ha avec une valeur moyenne de l'ordre de 20 t/ha.

La *taïga,* immense forêt subarctique de conifères, constitue un des biomes majeurs de l'hémisphère nord. Elle recouvre le

BCU IASI / CENTRUL DE INFORMARE

bouclier sibérocanadien sur une dizaine de millions de km^2 et s'étend en moyenne entre le 45e et le 57e degré de latitude nord. Cependant, elle dépasse localement le cercle polaire en Alaska, en Sibérie et en Scandinavie.

La forêt boréale de conifères occupe une zone où les précipitations sont assez faibles (de 250 à 700 mm) mais étalées sur l'ensemble de l'année, avec un maximum estival.

La respiration réduite des aiguilles persistantes permet aux conifères de supporter un hiver rigoureux malgré le faible apport d'eau (sol gelé). Des pins sylvestres peuvent ainsi croître jusqu'à 70° N en Laponie. D'autres espèces (mélèze) perdent leurs feuilles en automne.

La taïga exige pour croître un minimum d'un mois où la température moyenne est supérieure à 10° C et deux mois consécutifs sans gelée.

La forêt boréale de conifère se développe sur des sols d'origine glaciaire peu épais et très lessivés (Podzols). La décomposition lente des matières organiques, la pauvreté en azote, phosphore, calcium et autres éléments minéraux nutritifs conduit à l'accumulation dans le sol d'un humus brut (= mor) très acide, colonisé par le mycelium de champignons qui couvre d'un feutrage épais les racines des conifères avec lesquels ils forment une association symbiotique (mycorhizes).

La composition spécifique de la strate arborée dépend des conditions paléoécologiques et du climat actuel. En Europe, les espèces dominantes sont d'Est en Ouest le pin sylvestre, l'épicéa (Picea excelsa) puis en Sibérie *Picea obovata, Abies sibirica, Larix sibirica, L. dahurica* et *Picea pumila.*

En Amérique du Nord, le climat est constitué par diverses espèces de pins et d'épicea, en Alaska et en Colombie britannique ; d'épiceas, de sapins et de mélèzes de l'Est des Rocheuses jusqu'au Labrador ; enfin de pins et d'Hemlocks (*Tsuga canadensis*) autour des grands lacs. La diversité spécifique est toujours faible.

Vers le sud, une forêt mixte de conifères et de feuillus fait la transition avec la forêt caducifoliée tempérée tant en Amérique du Nord qu'en Eurasie.

Notons aussi que l'on retrouve la taïga dans les Alpes et autres montagnes tempérées où elle correspond aux forêts de conifères de l'étage subalpin (voir plus loin) : pins cembro, pins à crochet, mélèze et épicea en constituent le peuplement arboré.

La faune ressemble beaucoup à celle des forêts caducifoliées. Les invertébrés et les petits rongeurs hivernent sur place. Les oiseaux émigrent vers le Sud. Les grands herbivores : élans (*Alces alces*), rennes (*Rangifer tarandus*) se nourrissent de bourgeons, d'écorces et de lichens corticoles. La densité en grands cervidés est faible. On

BOURAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

compte un élan par 200 ha en Suède. La taïga héberge aussi une zoocœnose typique de carnivores : loup, glouton, lynx, renards, visons, martres, etc... Enfin, les ours au régime omnivore jouent un rôle écologique non négligeable : *Ursus arctos* en Eurosibérie, *Ursus americanus* (Barribal) et U. *horribilis* (grizzly) en Amérique du Nord.

Les insectes phytophages et xylophages peuvent aussi pulluler dans les forêts boréales de conifères. Ainsi, la tordeuse des conifères (*choristoneura fumiferana*) cause de temps en temps des défoliations importantes aux forêts de sapin beaumier et d'autres conifères canadiens.

La biomasse sur pied de la taïga est généralement comprise entre 60 et 400 t/ha avec une valeur moyenne de l'ordre de 200 t/ha. (Cf. Fig. 1.6).

La *toundra* correspond au biome qui occupe les zones comprises entre la limite naturelle des arbres vers les pôles et les régions parabiosphériques arctiques et antarctiques. En réalité, la toundra est presque entièrement boréale, par suite de la rareté des terres émergées dans l'hémisphère austral au-delà du 45° sud. Elle occupe surtout des territoires situés au-delà du cercle polaire dans l'ancien monde mais descend au-dessous du 60° nord en Alaska et au Labrador.

La toundra est constituée par une mosaïque de biocœnoses dont la composition botanique est conditionnée par les facteurs climatiques et édaphiques. La brièveté de la saison végétative (60 jours en moyenne) et la faiblesse des températures estivales (toujours inférieures à 10 °C) constituent les principaux facteurs limitants. Par suite de la longue durée de la période hivernale et de la rigueur des températures, les sols des toundras dénommés *permafrost,* sont gelés en profondeur de façon permanente ; seules les couches superficielles sur quelques décimètres à quelques mètres dégèlent pendant l'été. Une telle structure pédologique empêche le drainage des eaux de fonte superficielles et provoque la genèse de formations particulières aux régions arctiques comme les sols polygonaux.

La composition végétale des biocœnoses, peu diversifiées, varie localement selon la latitude, les précipitations, et divers autres facteurs écologiques. Les plantes arbustives (bouleaux, saules nains, bruyères) prédominent au sud et dans les zones les moins froides. Ailleurs, elles laissent la place à des végétaux herbacés — graminées et *Carex* surtout — et à des cryptogames, en particulier des lichens du genre *Cladonia* lesquels constituent la nourriture de base des rennes. La biomasse est faible à peine comparable à celle des déserts,

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

avec une valeur moyenne de 6 t/ha. Le chiffre de 30 t/ha avancé par Rodin et Bazilevic constitue un maximum atteint dans des conditions très favorables sinon exceptionnelles. Comme dans les déserts, mais pour des raisons climatiques différentes, la strate hypogée est fort importante.

Si la zonation en latitude des macroécosystèmes apparaît en définitive de façon très nette à la surface des continents, il n'en est plus du tout de même lorsque l'on étudie *l'hydrosphère.*

Par suite de l'isotropie du milieu aquatique, les facteurs physico-chimiques y varient beaucoup moins et de façon plus lente que dans le milieu terrestre. En effet, les phénomènes de convection et de diffusion des substances solubles, enfin les courants marins, assurent une certaine uniformisation des facteurs abiotiques, ce qui limite le nombre d'habitats possibles et rend difficile la distinction de grands biomes. D'ailleurs, les océanographes n'utilisent pas d'habitude ce terme.

On désigne sous le terme d'*ecosystèmes limniques* l'ensemble des eaux courantes, lacustres et stagnantes continentales. On les subdivise en écosystèmes *lentiques* (lacs, étangs, marais) où le renouvellement des eaux est très lent et en écosystèmes *lotiques* (fleuves, rivières, torrents, etc. . . ,) où celui-ci est rapide.

Les conditions écologiques qui prévalent en milieu lentique sont très variées selon la localisation géographique, la dimension, l'ancienneté, les caractères physico-chimiques de la collection d'eau considérée. De façon générale, la teneur en oxygène dissous des lacs et *a fortiori* des marais est relativement faible à cause de la faible agitation des eaux ce qui les rend très vulnérables à toute pollution par des matières organiques (Cf. chap. VI, p. 352 et suiv.).

On peut distinguer parmi la grande variété écologique des milieux lacustres quelques catégories remarquables par leurs particularités ou leur fréquence :

— les lacs de tourbière p.e se caractérisent par leurs eaux acides. Ils se rencontrent dans des régions à climat froid et humides (Toundra, zone alpine des montagnes tempérées). Une flore et une faune très spécialisées leur sont associées.

— les marécages et les lacs d'eaux saumâtres sont propres aux zones littorales (Camargue p.e), et aux régions continentales de climat aride (Grand lac salé de l'Utah, Chotts maghrébins, etc. . .). Ils se caractérisent par une fluctuation saisonnière de la teneur en sel d'autant plus importante qu'ils sont moins profonds. Ceux dont la teneur reste relativement constante représentent une exception (lacs homoiohalins). En conséquence, la faune qu'ils hébergent est adaptée à ces conditions d'euryhalinité ou est constituée d'espèce à brève durée de vie qui se multiplient pendant la période du cycle annuel où la composition chimique de l'eau convient à leurs exigences (c'est p.e le cas de toute une série de petits crustacés d'eaux saumâtres).

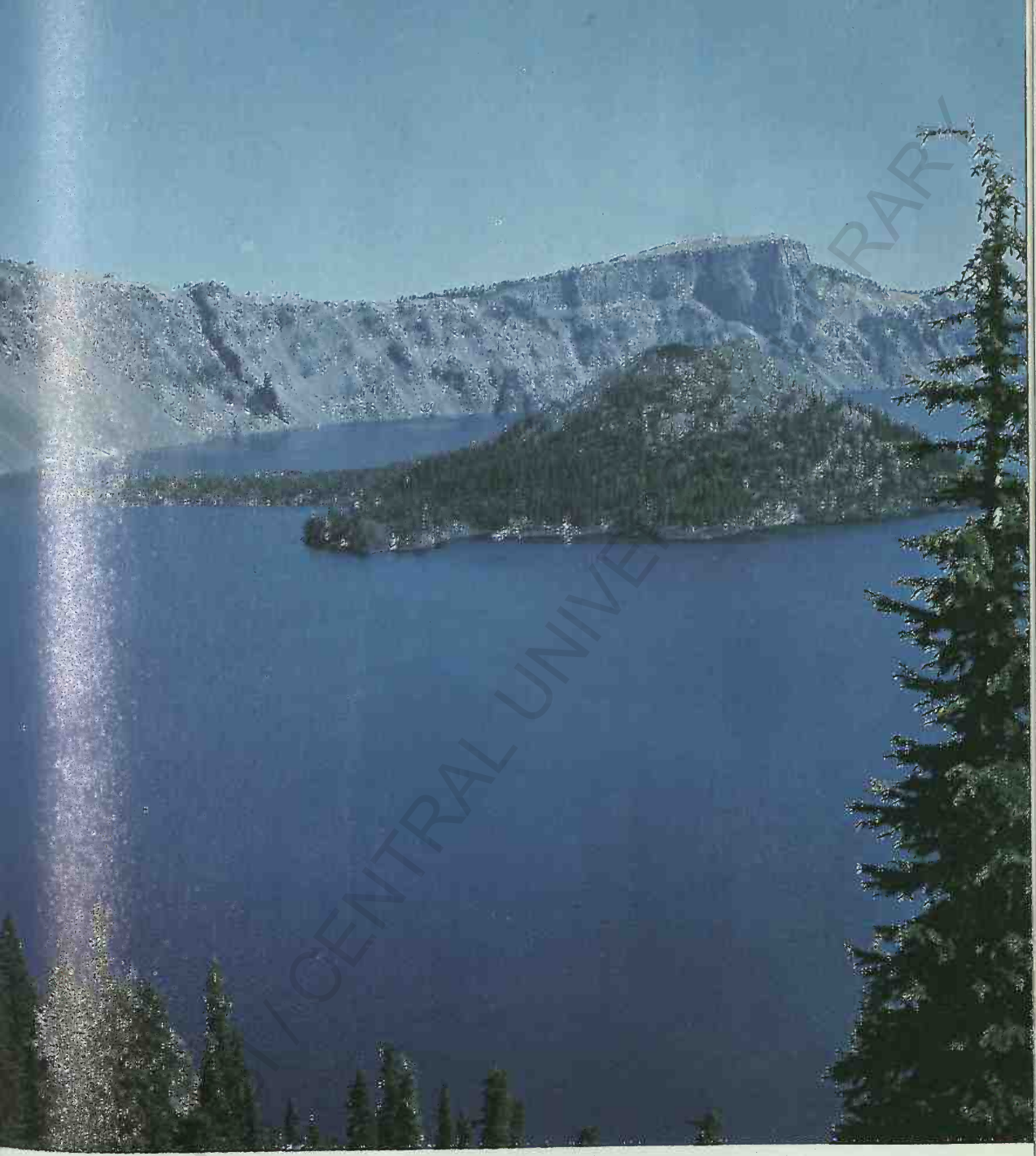


Fig 1,6 d

Le Crater lake (Oregon) est un lac oligotrophe dont les eaux, particulièrement pauvres en éléments minéraux nutritifs, sont d'une spectaculaire transparence. La rareté concomitante du plancton explique, conjointement à la grande profondeur (plus de 600 m) la couleur bleue azurée des eaux de ce lac. Cliché F. Ramade.

Les lacs d'eaux douces peuvent être classés en 3 grandes catégories en fonction de leur richesse croissante en éléments minéraux nutritifs dissous : oligotrophes, mésotrophes et eutrophes.

Les lacs oligotrophes possèdent des eaux très pures, d'une grande transparence, leur productivité biologique et leur biomasse sont faibles. A l'opposé, les lacs eutrophes, riches en éléments minéraux nutritifs sont très productifs et renferment une forte biomasse. Il existe quelques lacs continentaux très vastes et très anciens (lacs du rift africain, lac Baïkal) qui présentent une très grande richesse biologique. Le Baïkal p.e, long de près de 700 km, situé en Sibérie orientale, est d'une telle ancienneté que plusieurs familles d'animaux et de nombreux genres sont endémiques de cette vaste étendue d'eaux continentale. Ainsi, chez les Mollusques gastéropodes, les *Baïkaliidae*, chez les poissons huit genre de *Cottidae* et même un phoque d'eau douce *Phoca sibérica* lui sont inféodés.

Les écosystèmes lotiques diffèrent des précédents par leur oxygénisation plus intense, la relative pauvreté en plancton lequel abonde au contraire dans la plupart des formations lacustres. Enfin, les êtres vivants benthiques où prédominent toute une série de larves d'insectes appartenant à des ordres variés, sont adaptés à la présence d'un courant permanent (Rhéophilie).

De nombreuses espèces de poissons d'intérêt économique (saumons, aloses, esturgeons, anguilles, etc. . .) se développent dans divers biotopes fluviaux. Il s'agit souvent d'espèces migratrices venant pondre en rivière (saumon p.e) et achevant leur développement en mer (espèces dites potamotoques) ou au contraire d'espèces pondant en mer et venant se développer jusqu'à l'état adulte en rivière, comme l'anguille p.e (espèces Thalassotoques). Dans un cas comme dans l'autre, l'écologie particulière à ces espèces migratrices les rend beaucoup plus vulnérables à la pollution des eaux que les espèces sédentaires.

Les variations climatiques sont de plus faible amplitude dans l'hydrosphère que dans les écosystèmes terrestres, ce qui rend aussi aléatoire l'existence d'une nette zonation en latitude des biomasses dans les diverses communautés océaniques.

Planche VII

1) La "prairie" dans le Parc National de Wind Cave (South Dakota), supporte un des plus grands troupeaux de bisons, reconstitué à partir des rares survivants des massacres du siècle dernier. La prairie nord-américaine est une steppe graminéenne tempérée où dominent des espèces vivaces du genre Festuca. *Elle est aujourd'hui presque entièrement défrichée ou modifiée par l'élevage extensif des bovins. Quelques rares zones vierges en réserve subsistent encore surtout dans les Etats du Wyoming, des Dakota et du Montana, ainsi que dans l'ouest du Canada, dans l'Alberta, au pied des Rocheuses. (cliché F. Ramade).*

2 et 3) Chiens de prairie (Cynomys ludovicianus) *à l'entrée de leur terrier. Ces rongeurs terrestres fouisseurs, voisins des marmottes, vivaient en d'immenses colonies ("villes") comptant chacune plusieurs milliers d'individus, dans les steppes nord-américaines. Ils constituaient avec les bisons et les antilopes pronghorn* (Antilocapra americana) *l'espèce dominante de ce biome. L'incompatibilité de leur mode de vie avec la mise en culture de la prairie a été la cause de leur extermination par les colons européens. (clichés F. Ramade)*

4) Vue de la forêt boréale de conifères (Taïga) dans le Norland suédois, au niveau du cercle polaire (cliché C. Boulard)

Planche VIII (verso)

Biomes boréaux

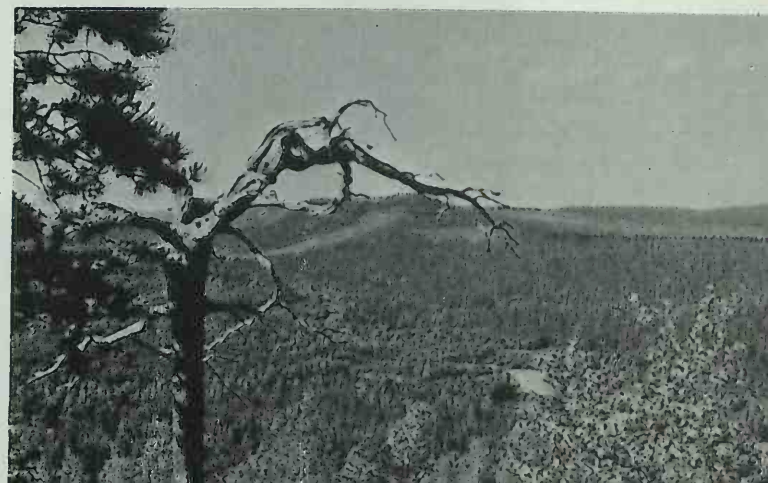
1) La limite de la taïga et de la toundra en Alaska. Remarquez l'interruption nette entre ces deux biomes délimités par une ligne d'arbres ("Tree line"), sans aucune formation intermédiaire. La toundra figurée ici est de type hygrophile, constituée par des marécages, des tourbières à sphaignes et des groupements arbustifs : bouleaux et saules nains en particulier (cliché M. Brosselin)

2) Rennes dans la taïga, en laponie suédoise. Cette espèce, qui constitue avec les élans et quelques autres cervidés le peuplement de grands herbivores de ce biome, se nourrit de lichens corticoles, de bourgeons, d'écorces et de la végétation herbacée estivale croissant dans les clairières (cliché C. Boulard).

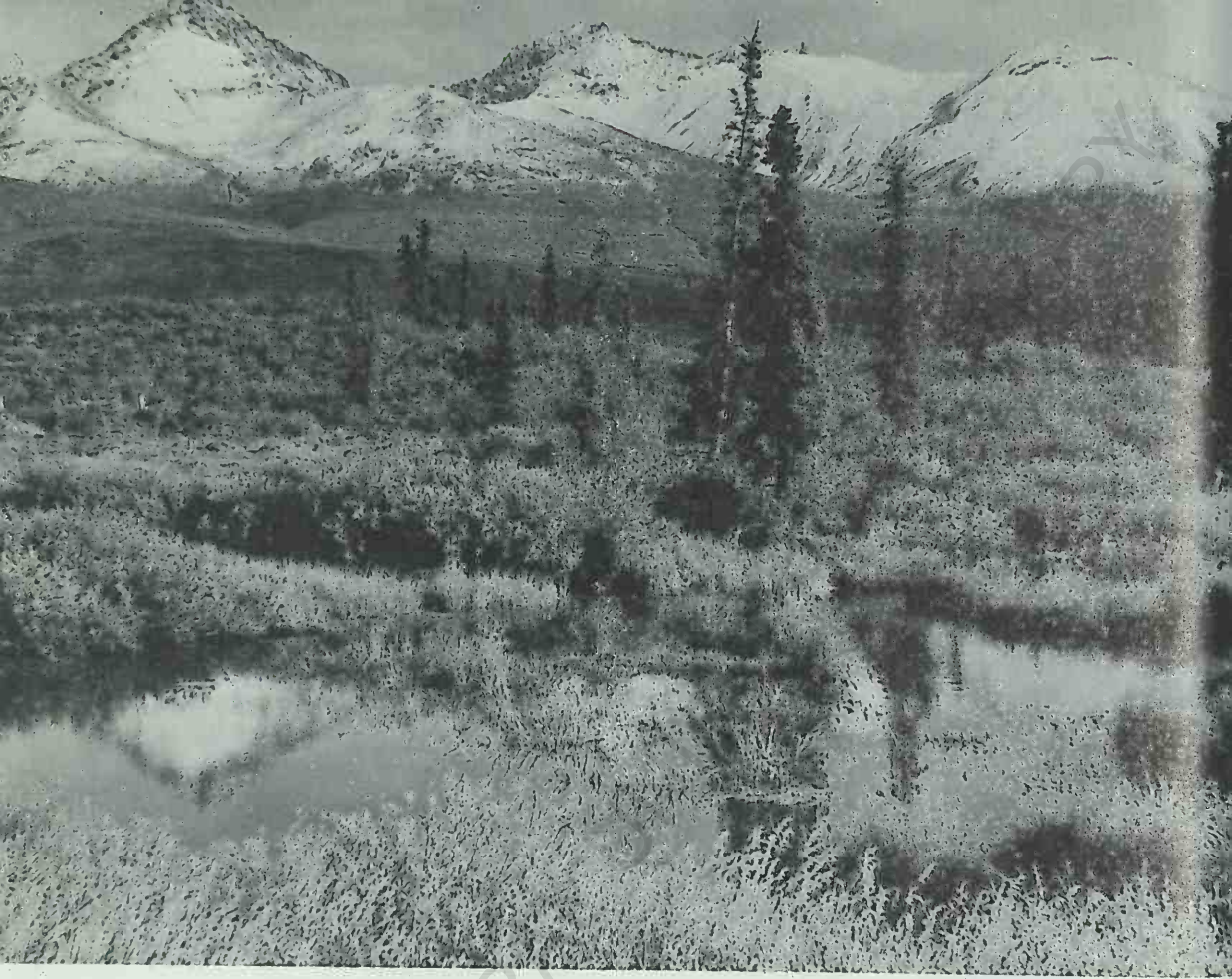
BCU IASI / CENTRU VECHI

1

2



4



1

2

BCU IAS CENTRAL LIBRARY

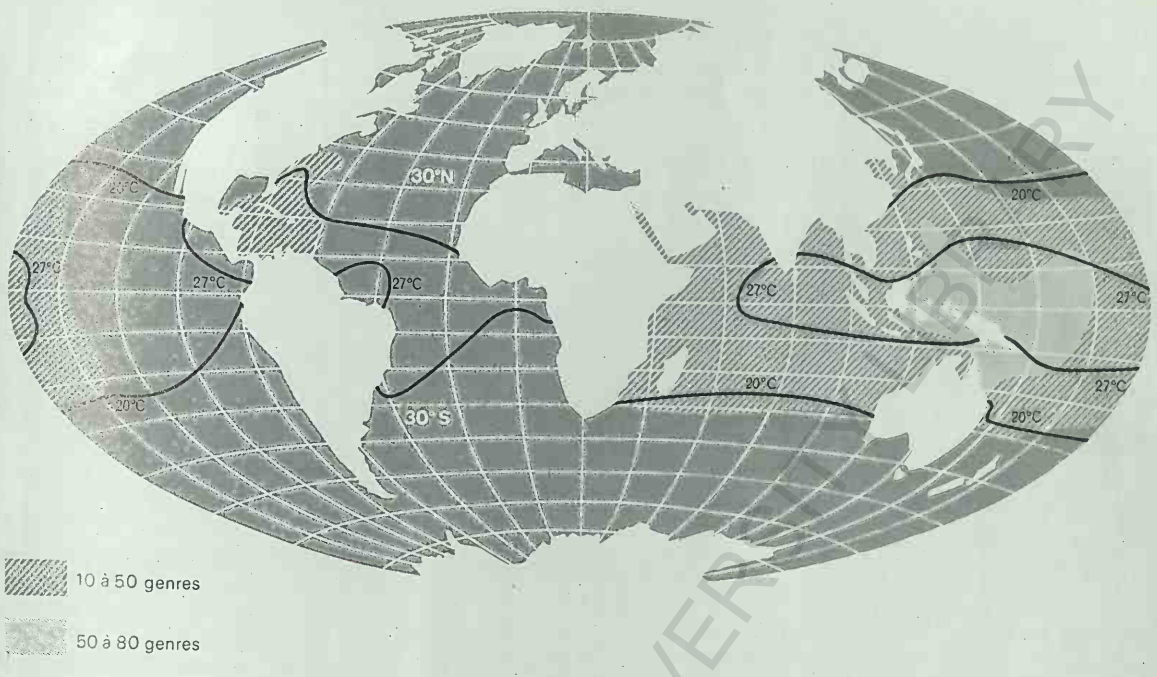


Figure 1.7
Répartition des récifs coralliens à la surface du globe. D'après Newell, Scientific American, Juin 1972, p. 60

Seules quelques grandes biocœnoses présentent une nette zonation en latitude. Tel est le cas des *récifs coralliens* dont le développement exige des températures de l'eau élevées, supérieures à 20 °C, ce qui explique la stricte localisation des madrépores à la zone intertropicale (fig. 1.7). De même, les biocœnoses circumpolaires sont aussi bien localisées en latitude et caractérisées par des espèces particulières sténothermes des eaux froides.

En réalité, au même titre que la luminosité et plus encore que la température, la teneur des mers en phosphates et nitrates, constitue le facteur limitant primordial du développement des biocœnoses océaniques (1). Le rôle essentiel dévolu à ces éléments minéraux permet de comprendre un fait paradoxal en apparence : les mers arctiques et antarctiques, malgré la faiblesse de leur température, renferment une des biomasses les plus élevées que l'on puisse observer dans l'hydrosphère. L'explication en est simple. La fonte

(1) Cela aussi est vérifié pour les écosystèmes limniques : étangs, lacs, marais etc.

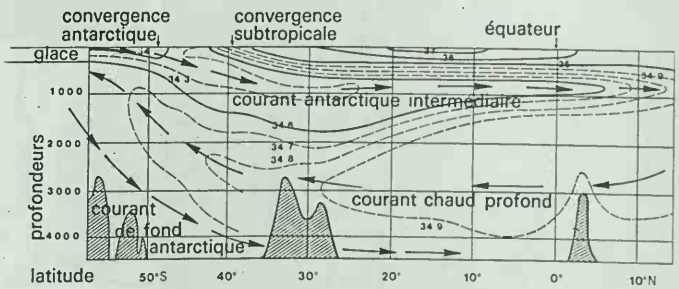


Figure 1.8
Transect méridien dans l'Atlantique Sud mettant en évidence les grands mouvements de circulation des masses d'eau. D'après Deacon in *Hardy,* The world of plancton, *Collins, Londres, 1971, p. 23*

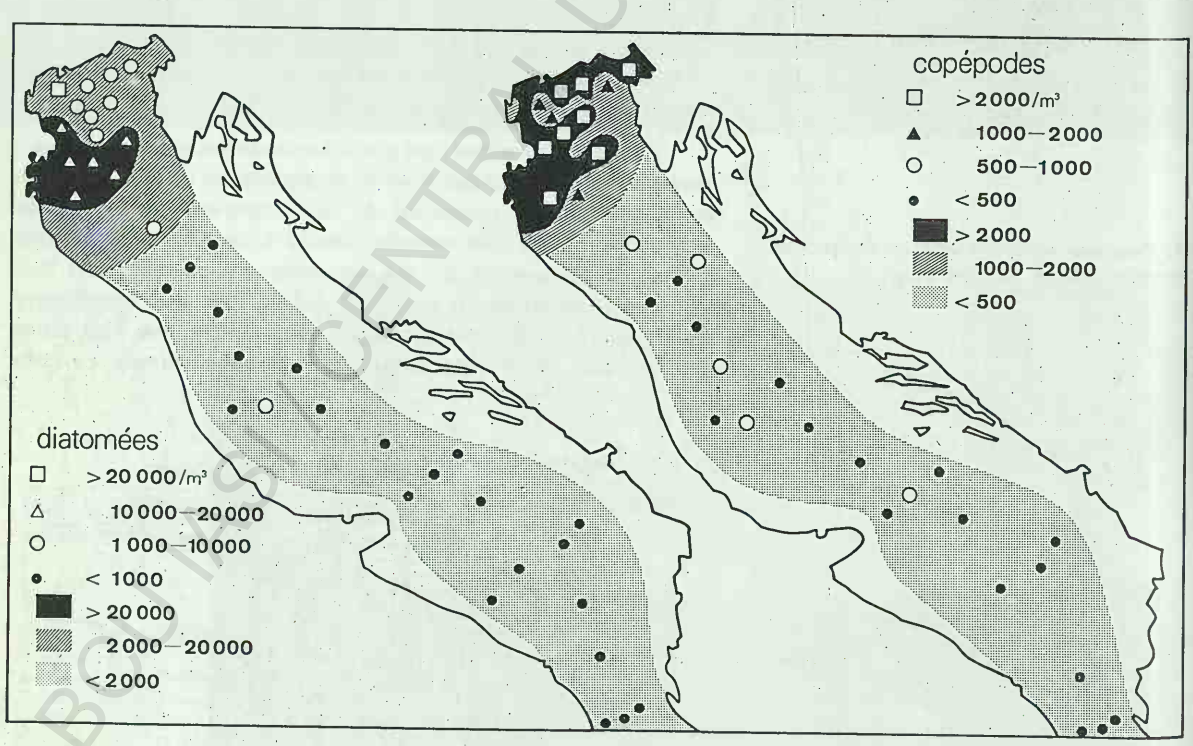
BU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

du pack de glace au printemps engendre des courants de surface qui provoquent indirectement une remontée des eaux profondes chargées de ces éléments nutritifs indispensables au niveau du plateau continental des mers polaires (fig. 1.8). Il s'ensuit une prolifération incroyable du phytoplancton, au début et à la fin de la belle saison, ainsi que des innombrables invertébrés et vertébrés qui s'en nourrissent.

De façon générale, d'ailleurs, les plus grandes concentrations en matière vivante et les biocœnoses les plus riches se rencontrent au niveau du plateau continental quelle que soit la latitude. En effet, c'est dans cette zone que débouchent les fleuves dont les eaux, qui ont lessivé les terres émergées, sont chargées en sels minéraux et en particulier assurent un apport important de phosphates et de nitrates (9). Aussi, n'est-il pas étonnant que les zones d'estuaires figurent, à côté des eaux littorales polaires et des récifs coralliens, parmi les régions océaniques dont la biomasse est maximale (Fig. 1.9).

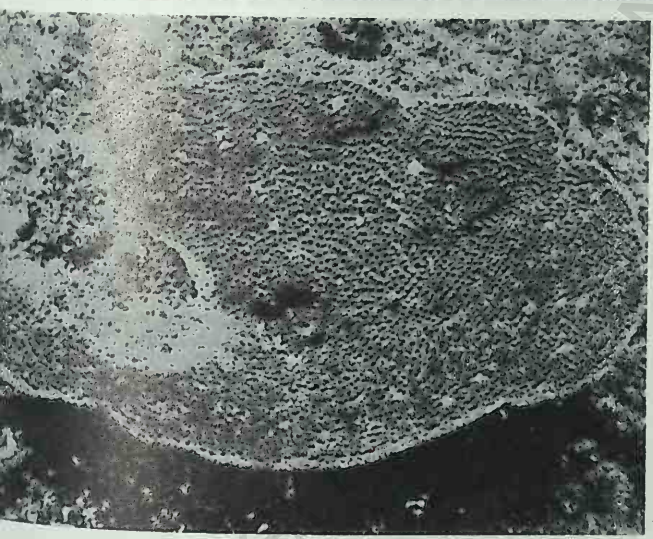
(1) Les régions d'"upwellings" souvent situées au niveau du talus continental sont aussi caractérisées par une très forte productivité biologique. Ici, les eaux profondes, chargées d'éléments minéraux nutritifs sont amenées dans la couche superficielle éclairée par des soulèvements d'eaux intermédiaires engendrés par des divergences de courants permanents ou de courants saisonniers provoqués par les vents.

Figure 1.9
Représentation de la productivité biologique de l'Adriatique et de ses relations avec l'apport d'éléments minéraux par les fleuves qui s'y déversent. On remarque une densité maximale des producteurs primaires (Diatomées) et des consommateurs primaires herbivores (copépodes) dans les eaux voisines des deltas du Po et de l'Adige. D'après d'Ancona et coll. in *Marcuzzi,* Ecologia animale, *Feltrinelli, 1968, p. 229*



BOTANISCH CENTRAAL UNIVERSITY LIBRARY

1



3

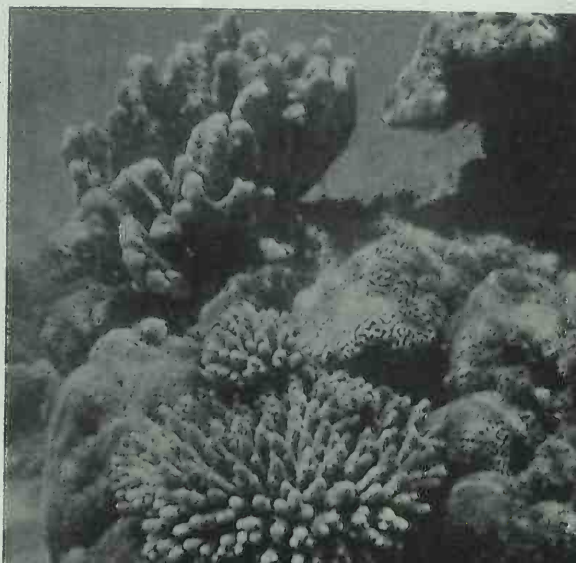


Planche IX
Récifs coralliens à Madagascar
1) Platier émergeant à basse mer (Récif de Tuléar)
2) Vue sous-marine d'un madrépore du genre Turbinaria
3) Vue sous-marine d'un madrépore du genre Acropora
(Clichés M. Pichon)

BIBLIAS

1

2

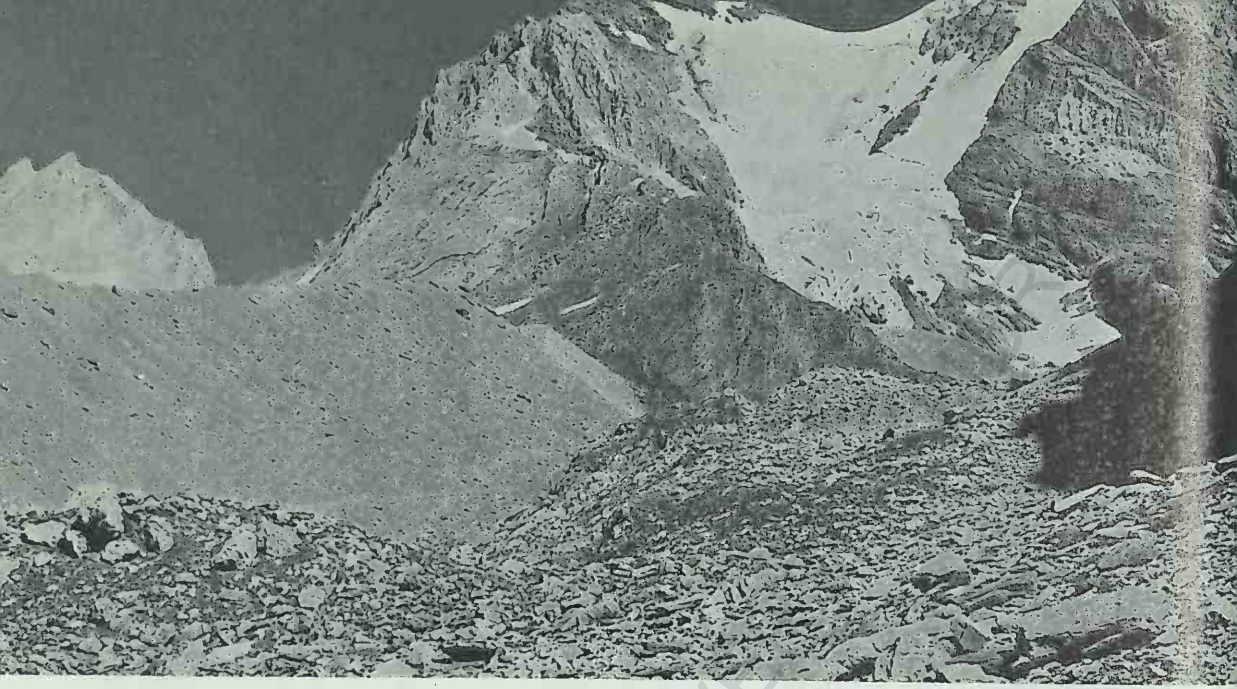
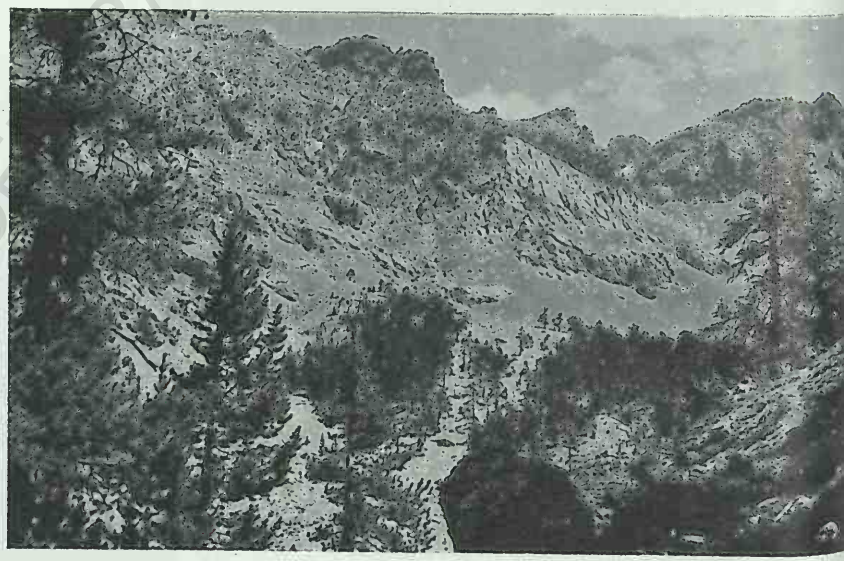


Planche X

Zonation verticale de la végétation dans les Alpes

1) Limite supérieure des phanérogames dans le Massif de la Vanoise. Les taches sombres du premier plan correspondent à des plantes herbacées ayant colonisé un pierrier dans la partie supérieure de l'étage alpin, dénommé étage nival. On remarque au fond le sommet de la Grande Casse

2) Vue du sommet de la Font-Sancte (Hautes-Alpes), dans la Réserve communale du Val d'Escreins. La forêt de conifère s'interrompt vers 2 300 m, la toundra de montagne (étage alpin) monte jusqu'à 2 900 – 3 000 m. Au-dessus, on pénètre dans la zone parabiosphérique (neiges éternelles)



3) Limite supérieure de l'étage subalpin, dans le val d'Escreins. Quelques pins à crochets (Pinus uncinata) *et des mélèzes* (Larix decidua) *pluri-centenaires ont réussi à coloniser les éboulis, malgré la sévérité des conditions écologiques qui règnent à ces hautes altitudes.*

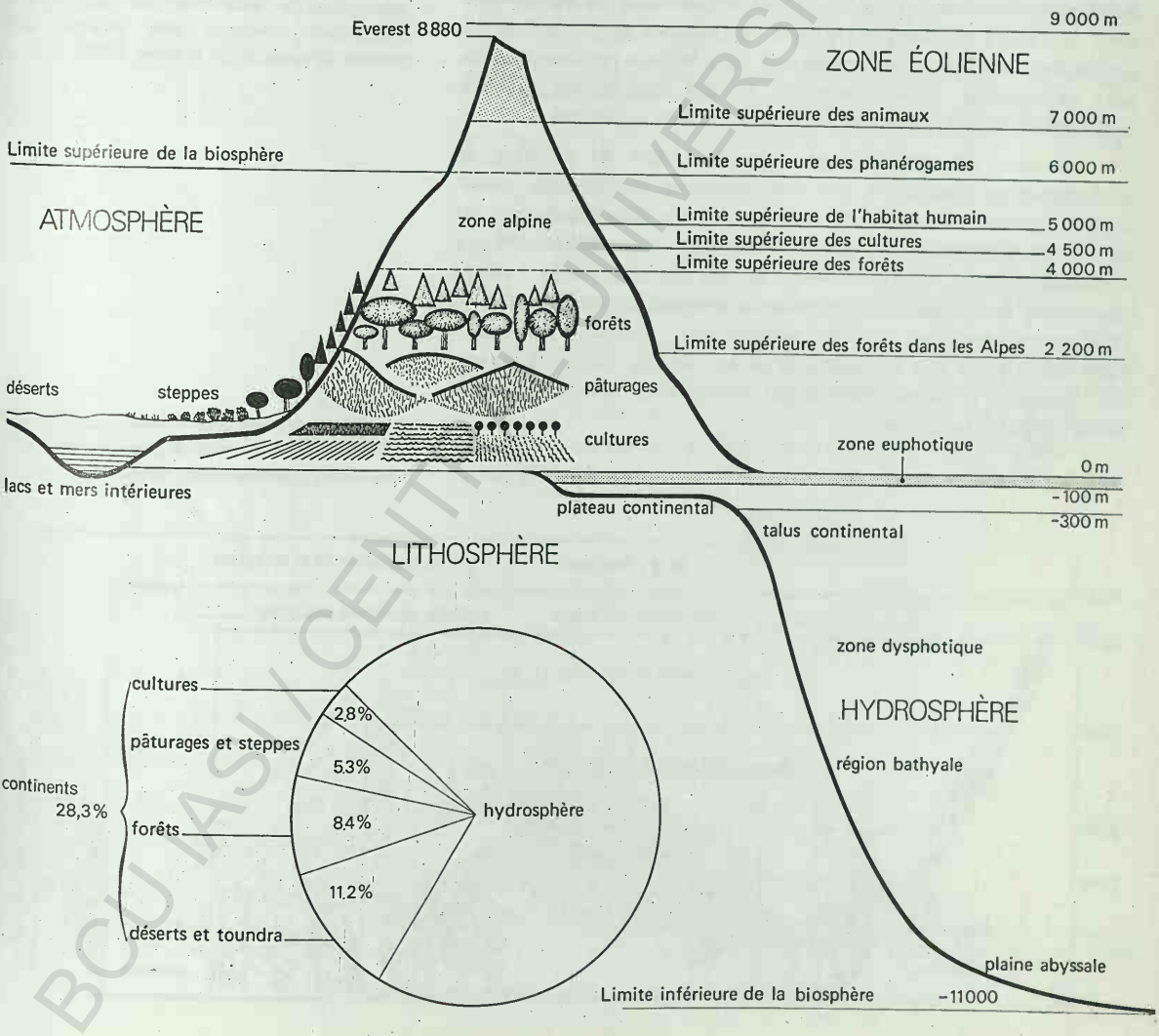
La flèche sur la photographie (2) indique le lieu où a été réalisée la photographie (3)

A l'opposé, les eaux bleues superficielles tropicales, très pauvres en éléments nutritifs indispensables, sont quasi désertiques et renferment une biomasse très faible, malgré la diversité considérable de leur peuplement biocœnotique.

Zonation en altitude

La zonation de la biosphère en altitude est encore mieux définie que ses subdivisions en latitude. Du fond des abysses océaniques au sommet des plus hautes montagnes, elle présente une succession de milieux très différents (Fig. 1.10).

Figure 1.10
Zonation verticale de la biosphère et répartition des surfaces occupées par ses grandes subdivisions



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le domaine océanique s'étend des fosses les plus profondes (— 11 000 m environ) au niveau 0 (surface des mers). Sa profondeur moyenne est de 3 800 m. L'existence du plateau continental, zone marquée par une brusque rupture de pente (talus continental) située vers — 200 m, permet de distinguer : une province néritique, dont la teneur des eaux en éléments nutritifs varie beaucoup selon les apports fluviaux et d'autres facteurs, et une province océanique, au large des côtes, dont les eaux présentent une grande constance physico-chimique et dont les fonds s'étendent au-delà de — 200 m. Elle occupe une surface égale aux 9/10^{e} de la surface totale de l'océan.

Plus importante est la distinction entre zones euphotique et dysphotique.

La première correspond à la région dans laquelle pénètre la lumière c'est-à-dire celle où la photosynthèse est possible. Tous les organismes autotrophes (algues et phytoplancton) se concentrent dans la région euphotique, laquelle ne dépasse guère 100 m de profondeur, tant dans les océans que dans les lacs continentaux les plus transparents. Seule une mince couche superficielle est donc responsable de la production primaire en milieu aquatique.

La zone dysphotique, qui s'étend au-delà de — 100 m de profondeur, se caractérise par une obscurité permanente, aucun rayon lumineux ne pénétrant dans ces régions océaniques. Elle est de ce fait dépourvue d'organismes végétaux autotrophes. On n'y rencontre que des hétérotrophes — surtout des invertébrés — qui se nourrissent aux dépens des matières organiques synthétisées par les producteurs dans les couches superficielles. Celles-ci, essentiellement constituées par les cadavres et les excreta des êtres vivants qui occupent la région euphotique, tombent en une pluie perpétuelle au fond des abysses.

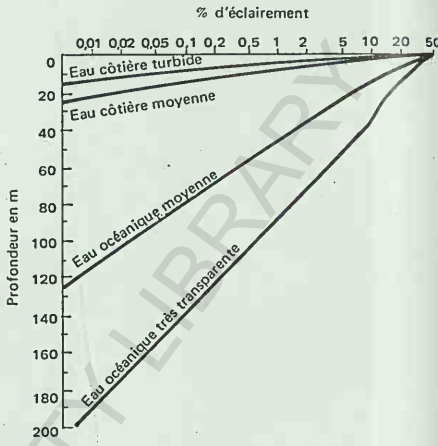
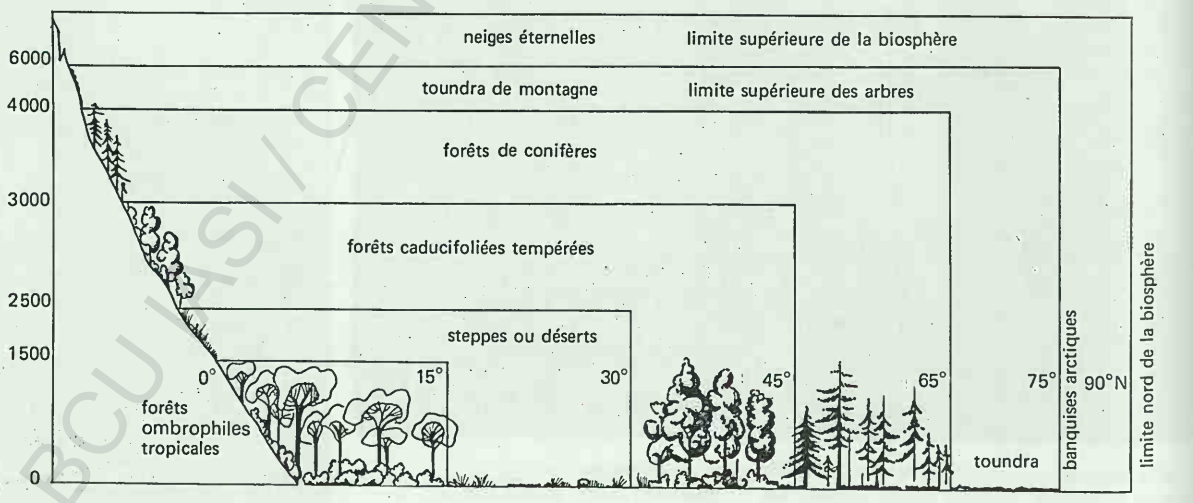


Figure 1.10b
Diminution de l'éclairement en fonction de la profondeur croissante dans diverses eaux marines (D'après Jerlov in *Peres, 1976).*

Figure 1.11 a
Concordance entre la distribution en altitude et en latitude des biomes. D'après Wolcott, Animal biology, *McGraw-Hill, 1946*



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La zonation verticale des biocœnoses terrestres apparaît très nettement dans les régions continentales au relief accusé. A bien des égards, la répartition en altitude des communautés d'êtres vivants s'apparente à la distribution latitudinale des grands biomes (Fig. 1.11).

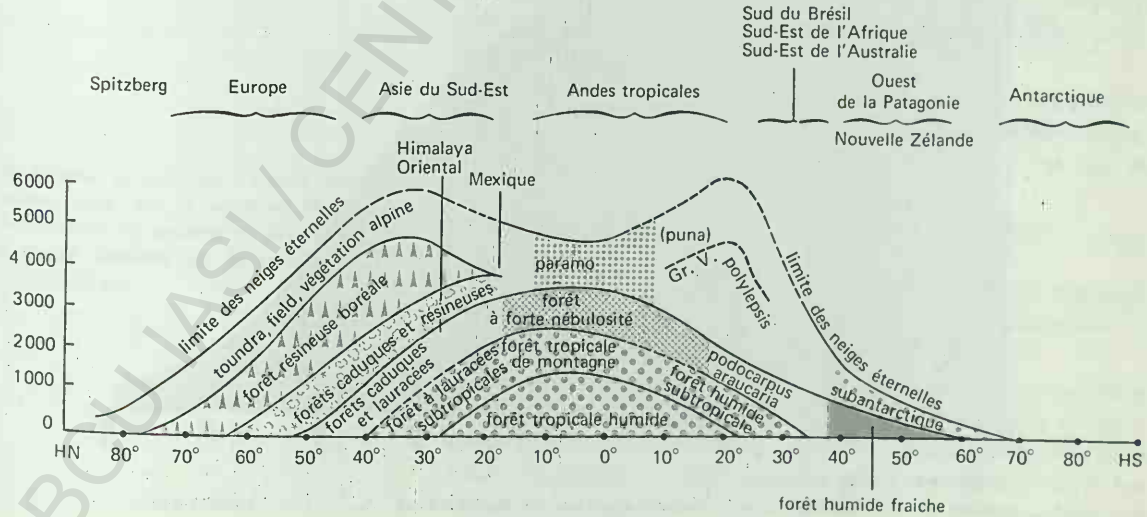
Une telle observation est à la portée de tout naturaliste qui voyage quelque peu dans les Alpes françaises. Si l'on fait par exemple un transect dans les Alpes maritimes, on rencontre successivement, du niveau de la mer au sommet du Mercantour, tous les biomes qui se succèdent du sud au nord depuis la Méditerranée jusqu'au cercle polaire arctique : forêts sclérophylles latifoliées, caducifoliées, sempervirentes, puis toundra de montagne (la prairie alpine). Au-delà, les neiges éternelles (zones nivales) constituent le désert alpin, comme le dénommait Jeannel (1950), région comparable aux milieux polaires.

De même dans les Pyrénées-Orientales, la zonation altitudinale est la suivante (d'après Lemée, 1967) :

Subdivision	*Limite supérieure* en mètres	*Groupements climaciques*
étage alpin	3 000	pelouses
" subalpin	2 400	forêt de conifères (pins)
" montagnard	1 600	forêt de hêtres et de sapins
" collinéen	1 000	forêt caducifoliée de chênes
		forêt sclérophylle semper-virente (divers chênes)

L'extension verticale maximum de la biosphère est atteinte dans les régions équatoriales et diminue progressivement jusqu'au niveau de la mer vers les zones polaires dont le bord des calottes glaciaires constitue la frontière naturelle des régions para-biosphériques.

Figure 1.11 b
Concordance entre la distribution en altitude et en latitude des biomes ; d'après Kühnelt. Précis d'écologie générale, *Masson, 1969.*



BOUJASI / CENTRE UNIVERSITAIRE

La limite supérieure des végétaux chlorophylliens se situe aux alentours de 6 000 m d'altitude (cependant la plus haute plante du monde, une stellaire, a été récoltée à 7 000 m au Makalu) (cf. fig. 1.10).

Au-delà on pénètre dans la zone éolienne (ou encore nivale) qui, à l'image des régions polaires, fait partie du domaine parabiosphérique. Seuls quelques alpinistes s'y aventurent, ainsi que de rares oiseaux en migration — on a observé des grues et des oies vers 7 900 m d'altitude dans l'Himalaya.

La limite supérieure de l'habitat humain se situe dans la zone de la prairie alpine vers 5 200 m d'altitude (dans les Andes). La prairie alpine est une toundra de montagne. Cette zone, dépourvue d'arbres, est occupée par une végétation herbacée ou buissonnante.

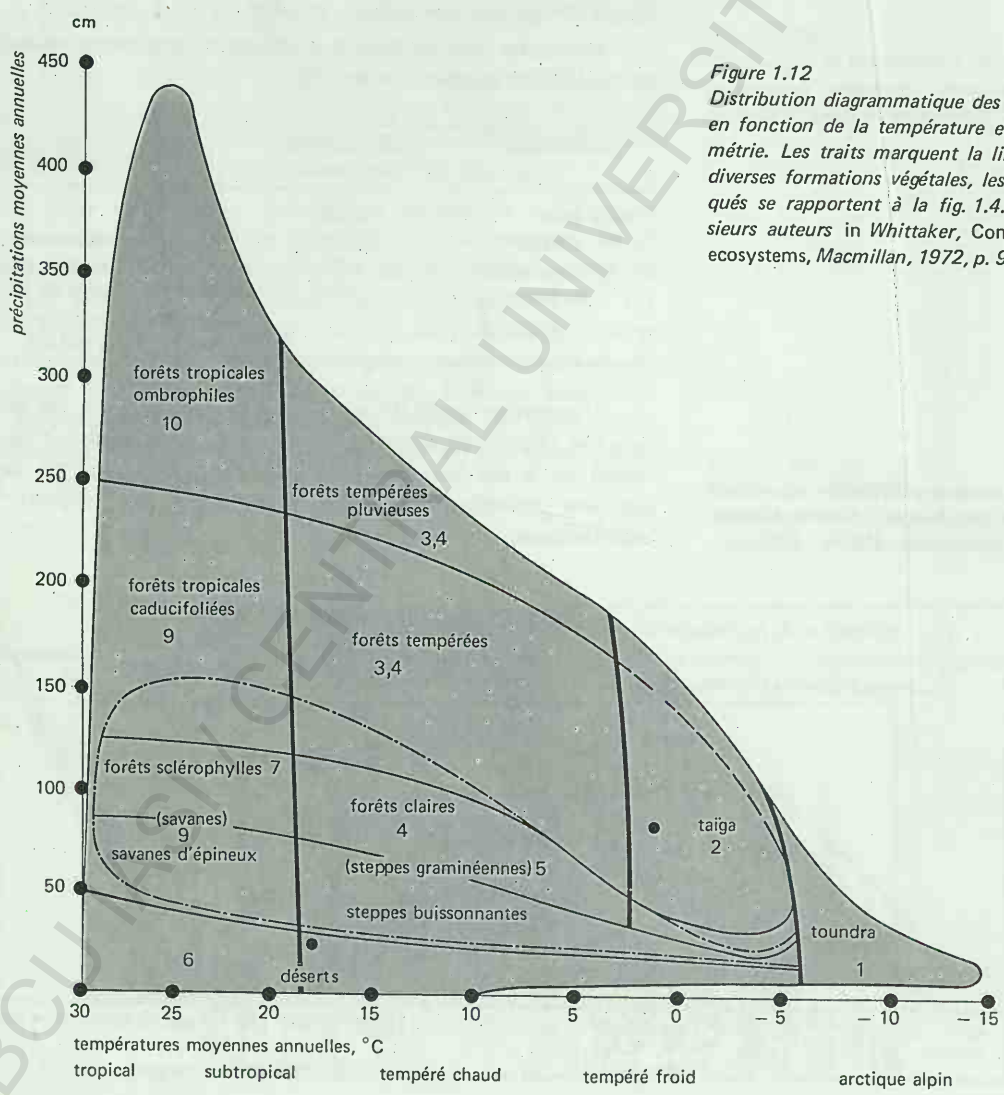


Figure 1.12
Distribution diagrammatique des grands biomes en fonction de la température et de la pluviométrie. Les traits marquent la limite entre les diverses formations végétales, les chiffres indiqués se rapportent à la fig. 1.4. D'après plusieurs auteurs in *Whittaker,* Communities and ecosystems, *Macmillan, 1972, p. 9*

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Toutes les plantes qu'on y rencontre sont adaptées aux conditions climatiques très particulières qui y règnent (forte insolation, variations thermiques d'amplitude élevée, faible pression atmosphérique, etc.).

La limite supérieure des forêts est de 4 500 m bien qu'en réalité celles-ci dépassent très rarement 4 000 m même dans les régions équatoriales (1). Les activités agricoles ne sont guère possibles au-dessus de 4 500 m, même sous les tropiques.

L'altitude moyenne des continents, —875 m—, correspond donc à la zone d'extension optimale pour les forêts, les prairies et les cultures, écosystèmes dont l'importance relative varie selon la région considérée.

Notons enfin qu'une corrélation plus précise entre la répartition des biomes et les conditions climatiques peut être obtenue en tenant compte à la fois des températures et des précipitations (Fig. 1,12).

(1) Il n'existe plus aujourd'hui que quelques lambeaux de la plus haute forêt du monde — celle de la Sajama en Bolivie. Celle-ci constituée par des Rosacées géantes du genre *Polylepis,* s'étendait entre 4 500 et 4 900 m d'altitude, mais elle a succombé en quasi totalité sous la hache avant que sa protection, décrétée en 1939, ait pu être effectivement réalisée.

Cycle de la matière et flux d'énergie dans la biosphère

Le nombre total d'organismes vivant dans chaque biocœnose, la rapidité de leur développement et de leur reproduction, dépendent en dernière analyse du taux de pénétration de l'énergie dans l'écosystème, de la vitesse à laquelle son flux s'écoule à travers celui-ci, enfin du taux de circulation de la matière dans ce dernier.

Il est essentiel de souligner les différences entre flux d'énergie et cycle de la matière. Alors que carbone, azote, eau, phosphore etc., circulent entre biotope et biocœnose et peuvent être réutilisés *ad inifinitum,* il n'en est pas de même de l'énergie qui s'écoule sous forme d'un flux univoque au travers des êtres vivants qui peuplent la biosphère. Il s'agit là d'un phénomène de nature universelle qui obéit aux deux lois fondamentales de la thermodynamique (principes de Carnot).

Le premier principe stipule que l'énergie peut se transformer d'une forme en une autre mais ne peut ni se créer, ni se détruire, — l'énergie totale de l'univers demeurant constante — ce qui se traduit par l'expression *

$$\Delta E = \Delta H - \Delta W \qquad (1)$$

*ΔE désigne la variation d'énergie dans un système isolé, ΔH la variation de chaleur (ou *enthalpie* du système) et ΔW la quantité de travail exécutée par le système sur le milieu extérieur.

Toutes les molécules biochimiques possèdent une enthalpie élevée et négative, ce qui signifie qu'au cours d'une combustion le système perd de la chaleur au profit de l'environnement.

Le deuxième principe stipule que tout phénomène impliquant une transformation de l'énergie ne peut se produire sans dégradation de l'énergie d'une forme concentrée, ordonnée en une forme diluée, inutilisable (chaleur). Aucune transformation spontanée (de la lumière en composés organiques lors de la photosynthèse par

BCU IAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

exemple) ne peut présenter un rendement de 100 % ([1]). Une partie plus ou moins importante de l'énergie fournie au système est perdue, dégradée et passe sous un état désordonné devenant incapable de fournir un travail. On appelle *entropie* (S) la fraction de l'énergie ainsi perdue par le système au cours de tout phénomène thermodynamique (fig. 1.2 et 1.16).

Le second principe établit encore que tous les systèmes évoluent dans une direction déterminée, univoque, et tendent vers un état d'équilibre où l'ensemble des paramètres physiques (température, pression, etc.) deviennent uniformes. Cet état d'équilibre est atteint lorsque l'entropie de l'ensemble système-milieu extérieur devient maximale. Autrement dit, l'entropie de l'univers augmente.

Si l'on examine maintenant le cas particulier de la biosphère, il faut faire intervenir un autre paramètre, l'énergie libre (G) qui représente de l'énergie utilisable, l'opposé en quelque sorte de l'entropie. Cette énergie libre est capable d'effectuer un travail dans des conditions isothermes, et c'est bien le cas de l'ensemble des cellules vivantes auto ou hétérotrophes. Celle-ci est reliée aux autres facteurs énergétiques par relation.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \qquad (4)$$

ΔG et ΔS varient donc en sens inverse, mais leurs variations ne sont égales que si le système n'échange pas de la chaleur avec le milieu intérieur.

Dans le cas de la biosphère, où il y a absorption de chaleur par le système au détriment du milieu extérieur, la diminution d'énergie libre est inférieure à l'accroissement d'entropie du système.

Nous entrevoyons là une explication physique de la tendance spontanée des écosystèmes à évoluer vers un état de complexité et d'organisation biologique de plus en plus élevés, dans lequel la quantité d'énergie libre est maximale.

L'étude thermodynamique des échanges d'énergie dans la biosphère dépasse de fort loin le cadre de cet ouvrage. Précisons toutefois que les écosystèmes constituent des systèmes ouverts, qui effectuent des échanges de matière avec l'extérieur. Leur étude est de ce fait plus complexe que celle des systèmes fermés sur lesquels raisonne la thermodynamique classique.

En définitive, comme l'écrit E.P. Odum (1971) : *"l'interaction de l'énergie et de la matière dans l'écosystème est une préoccupation primordiale de l'écologiste. En fait, on peut dire que le flux univoque de l'énergie et la circulation des éléments sont les deux grandes lois de l'écologie générale puisqu'elles s'appliquent de façon identique à tous les environnements et à tous les organismes y compris l'homme".*

(1) Cependant le rendement énergétique des cellules vivantes, qui est en général de l'ordre de 60 %, surpasse de fort loin les meilleures machines thermiques construites par l'homme qui ne dépassent pas 30 %.

ΔG désigne la variation d'énergie libre,

ΔH la chaleur échangée entre le système et et le milieu extérieur,

ΔS la variation d'entropie,

T la température absolue.

BOUAKE UNIVERSITY LIBRARY

Chaînes et réseaux trophiques

La multitude d'êtres vivants qui peuplent une communauté est unie par des liens de nature alimentaire qui jouent un rôle essentiel dans la cohésion de la biocœnose. L'ensemble de ces liens constitue une chaîne trophique. Celle-ci assure la circulation de la matière et, en conséquence, le transfert d'énergie sous forme biochimique entre les divers organismes de l'écosystème.

Nous avons écrit plus haut que les êtres vivants peuvent se répartir en trois catégories selon leurs fonctions écologiques dans la communauté :

Les producteurs (autotrophes) pour la plupart des végétaux chlorophylliens, plantes vertes vasculaires en milieu terrestre, algues microscopiques (unicellulaires ou filamenteuses) dans les eaux. Ces producteurs utilisent une fraction du flux solaire qu'ils accumulent sous forme d'énergie potentielle (énergie libre) en le transformant en matières biochimiques élaborées à partir de gaz carbonique, d'eau et de sels minéraux. En ce sens, les éléments simples constituent le premier maillon de la chaîne alimentaire.

Les *consommateurs* (hétérotrophes) ne peuvent se nourrir qu'avec des matières organiques complexes (glucides, acides aminés, triglycérides). Ils dépendent donc entièrement des producteurs qui représentent la seule source d'énergie utilisable par les animaux, de façon soit directe dans le cas des herbivores (consommateurs primaires), soit indirecte dans celui des carnivores (consommateurs secondaires et d'ordre supérieur).

Un type particulier de consommateurs secondaires est constitué par les parasites d'autres animaux qui vivent de façon sédentaire, soit à la surface du corps de leur hôte (*ectoparasite*), soit dans les viscères de ce dernier (*endoparasite*). Leur mode de vie s'oppose à celui des prédateurs lesquels capturent leurs proies alors que le parasite ne tue pas nécessairement son hôte.

Les décomposeurs saprophytes : champignons, bactéries, levures et autres micro-organismes hétérotrophes utilisent la matière organique morte (détritus végétaux, excreta et cadavres d'animaux) dont ils assurent une minéralisation progressive et totale.

Ces divers types d'êtres vivants sont donc interdépendants en ce qui concerne leurs besoins en substances nutritives.

Si l'on schématise, sous forme linéaire, les liens alimentaires unissant chacun de ces groupes d'organismes, on obtient la figuration d'une chaîne trophique dans laquelle la nutrition des êtres vivants situés à un niveau déterminé dépend entièrement de ceux situés immédiatement en aval.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

On distingue d'habitude trois types de chaînes trophiques :

Les chaînes trophiques de prédateurs qui, partant d'un végétal, passent de petits organismes à des organismes de taille de plus en plus grande.

En milieu terrestre, les chaînes trophiques comportent en général trois ou quatre niveaux. Une des plus simples est constituée par le schéma :

Végétal → mouton → homme

Producteurs → herbivores → carnivores

Consommateurs

On rencontre souvent même deux niveaux trophiques successifs de carnivores.

Le type ci-dessous, par exemple, est assez fréquent dans les forêts tempérées :

Chêne →	chenille →	mésange →	épervier
Quercus	*Tortrix* sp.	*Parus* sp.	*Accipiter nisus*
(Producteur)	(Herbivore)	(Carnivore 1)	(Carnivore 2)

En milieu marin, les chaînes trophiques de prédateurs sont toujours plus longues que dans les écosystèmes terrestres. Le type de relation trophique ci-dessous est par exemple très fréquent (cf. Fig. 1.13 et Tableau II).

Tableau II

Structure d'une chaîne trophique

Niveau trophique	*Fonction écologique*	*Type d'organisme*	*Espèce*
I	Producteur	Phytoplancton	*Chaetoceros*
II	Consommateurs I (Herbivores)	Zooplancton	*Calanus* (Copépode)
III	Consommateurs II (Carnivores 1)	Poissons microphages	*Ammodytes*
IV	Consommateurs III (Carnivores 2)	Poissons macrophages	*Clupea* (Hareng)
V	Consommateurs IV (Carnivores 3)	Oiseaux ichtyophages	*Phalacrocorax* (Cormoran)

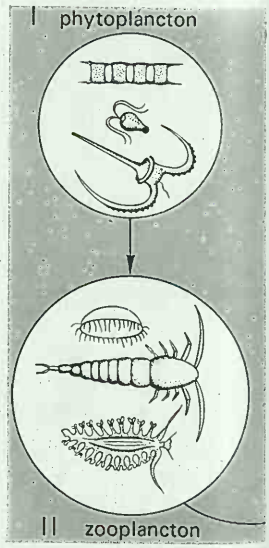


Figure 1.13a

Exemple de chaîne alimentaire. Les chiffres représentent le niveau trophique de chaque organisme.

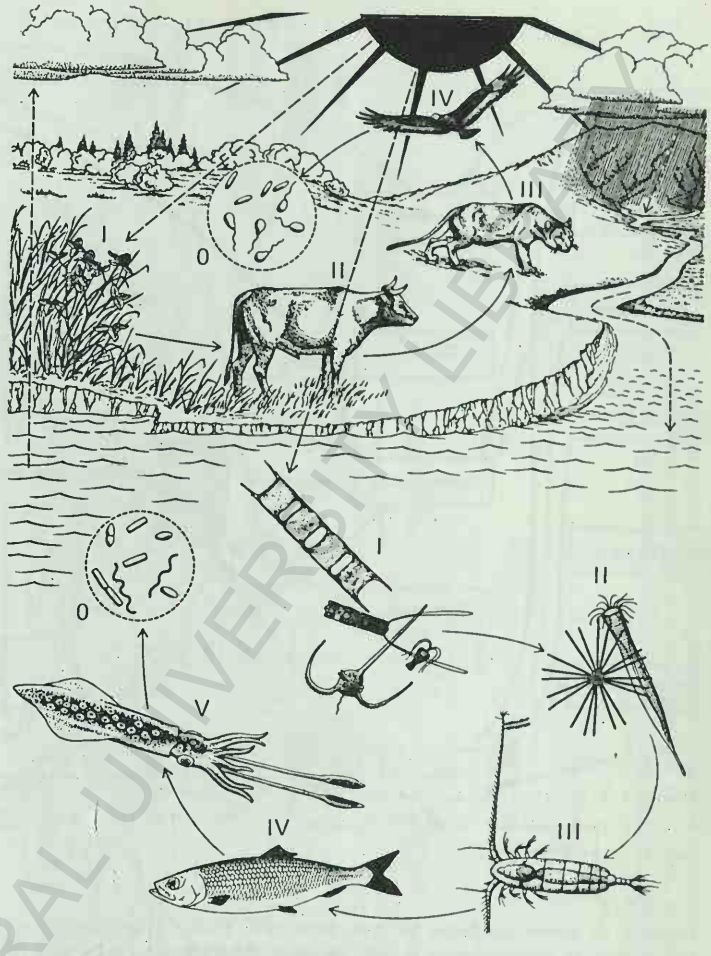
BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

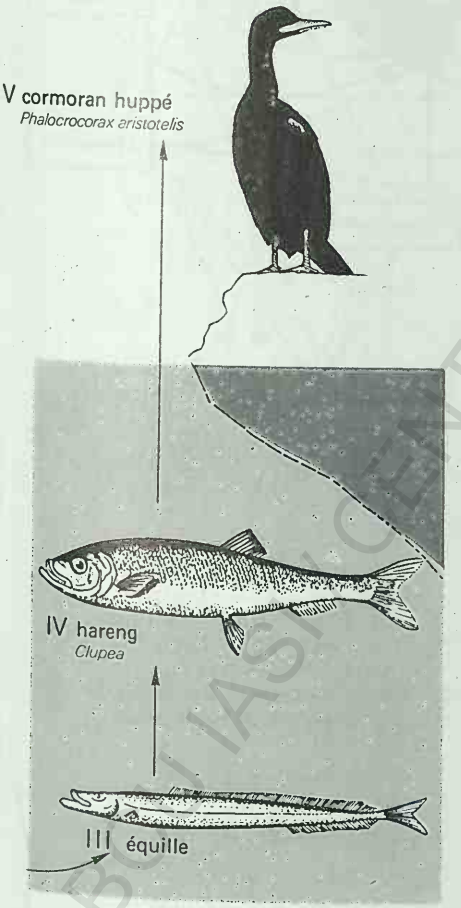
Figure 1.13b

Circulation de la matière et flux de l'énergie dans la biosphère

Producteurs (I)
Herbivores (II)
Carnivores (III, IV, V)
Décomposeurs (0)

Noter que le flux solaire représente le seul entrant énergétique du système. D'après Cole, Scientific American, Avril 1958





Les chaînes trophiques de parasites procèdent, au contraire des précédentes, d'organismes de grande taille vers des organismes de petite taille. Dans certains cas, plusieurs individus appartenant à des espèces fort éloignées au point de vue zoologique peuvent ainsi évoluer chacune à l'intérieur du corps de l'autre, le premier parasite étant l'hôte du second et ainsi de suite. Ce phénomène est fréquent chez les invertébrés où l'endoparasitisme intervient comme un facteur naturel essentiel de limitation des populations. Chez les insectes, par exemple, l'hyperparasitisme est fort répandu et l'on rencontre des chaînes trophiques organisées sur le schéma suivant :

n.t.I	*n.t.II*	*n.t.III*	*n.t.IV*
Végétal →	herbivore →	parasite →	hyperparasite
Sapin (*Abies alba*)	Chenille (*Choristoneura murinana*)	Braconide (*Apanteles* sp.)	Chalcidien

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

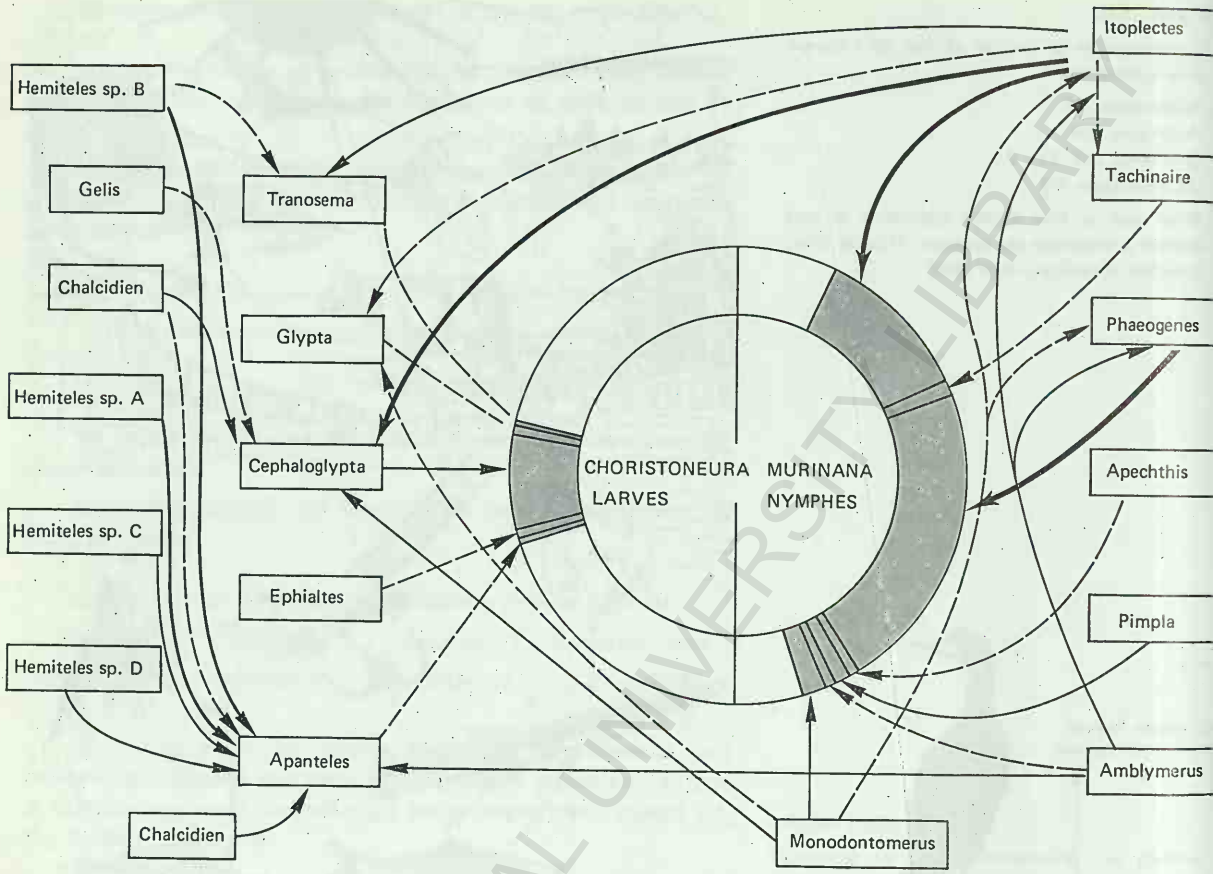


Figure 1.14
Exemple de réseau trophique de type parasitaire. Autour d'une chenille de Lépidoptère se nourrissant de pousses de sapin (Choristoneura murinana) *est installé tout un complexe biocœnotique, constitué par de nombreuses chaînes trophiques de type parasitaire. Dans les deux demi-cercles sont figurés en pointillé pour les chenilles et les nymphes les taux de parasitisme des divers entomophages. Les traits interrompus représentent un taux inférieur à 1 %, les traits fins continus un taux compris entre 1 et 5 %, les traits moyens de 5 à 10 %, et les traits épais plus de 10 %. Dans la colonne de gauche sont indiqués les hyperparasites. Les parasites primaires sont des Ichneumonides, des Chalcidiens (*Monodontomerus *et* Amblymerus*), des Braconides (*Apanteles*) et une Tachinaire. D'après Zwolfer et Kraus* in *Dajoz,* Précis d'Ecologie, *Dunod, 1971*

Autour de chaque espèce d'insecte phytophage gravite toute une zoocœnose de prédateurs et parasites (1) (cf. fig. 1,14) qui représentent autant de chaînes trophiques dont l'hôte constitue le maillon initial.

Le troisième type de chaîne trophique est constitué par les *chaînes saprophytiques* dans lesquelles la circulation de matière est à prédominance détritique. De telles chaînes trophiques jouent un rôle important en forêt caducifoliée, où la plus grande partie du

(1) Celle-ci réduit dans une proportion considérable les effectifs de l'espèce hôte.

BU LAVAL UNIVERSITY LIBRARY

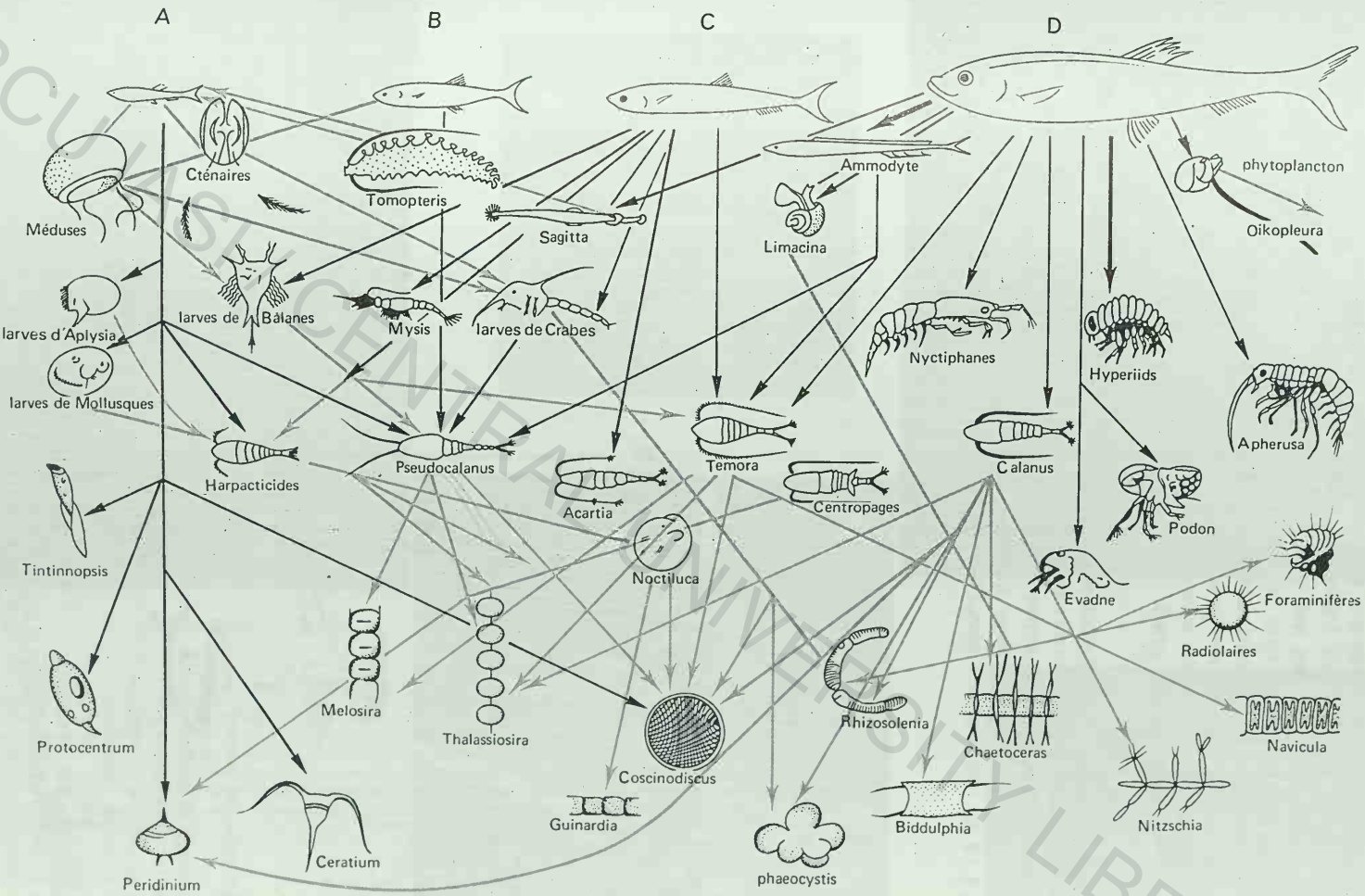


Figure 1.15

Réseau trophique du hareng. Ce schéma met en évidence la variété des relations trophiques selon les Ecophases d'une même espèce, constituées ici par les divers stades de croissance. A, individus de taille comprise entre 0,6 et 1,3 cm/B, entre 1,3 et 5,5 cm/C, entre 4 et 12,5 cm/D, au-dessus de 12,5 cm. Les traits continus figurent les aliments dont se nourrit cette espèce. Les autres liens trophiques sont portés en grisé. D'après Wells et Coll. in *Clarke,* Elements of Ecology, *Wiley, 1959, p. 416.*

BCU LAUSANNE CENTRALE CONVERTEY LIBRARY

feuillage n'est pas consommée par des herbivores mais constitue une litière de feuilles mortes. Celles-ci sont fragmentées par de nombreux animaux saprophages (insectes tels que les collemboles par exemple) puis reprises par les vers de terre qui assurent une bonne dispersion de l'humus dans les horizons superficiels du sol (formation d'un mull). Les champignons développent leur mycelium à ce niveau et, à l'extrémité de la chaîne, les microorganismes décomposeurs achèvent la minéralisation totale de la matière organique morte.

En réalité ces trois types de chaînes trophiques coexistent toujours dans un écosystème, de sorte que les diverses espèces de la communauté sont interconnectées par de multiples liens de nature alimentaire, dont l'ensemble constitue le réseau trophique de la biocœnose. Les fig. 1.15 et 1.16 illustrent bien l'organisation de tels réseaux.

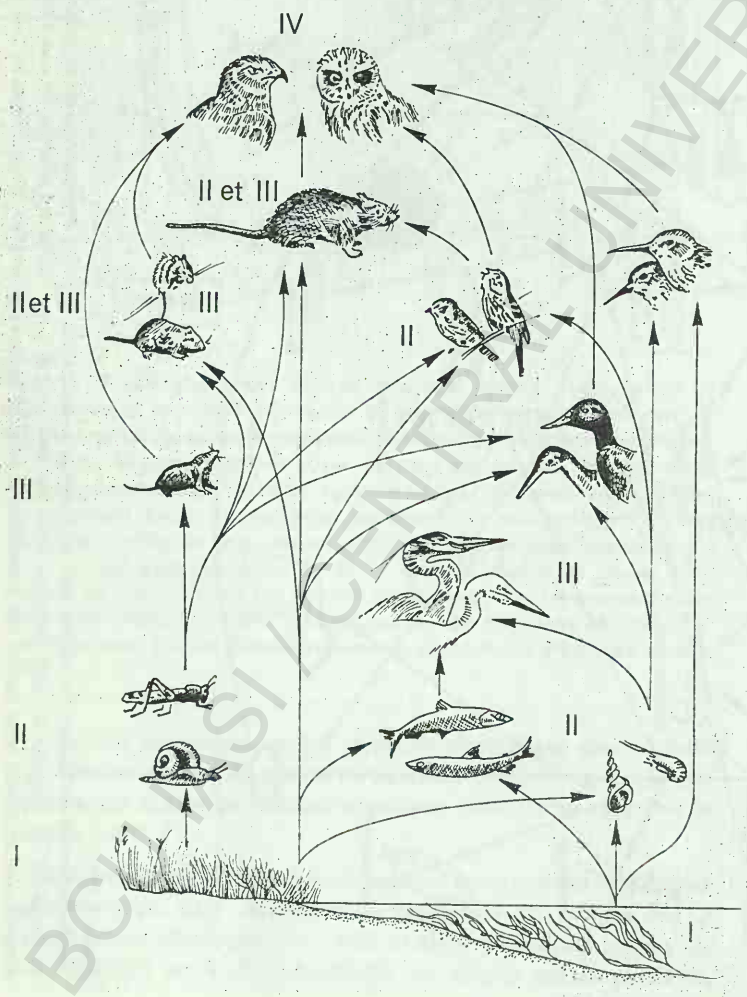
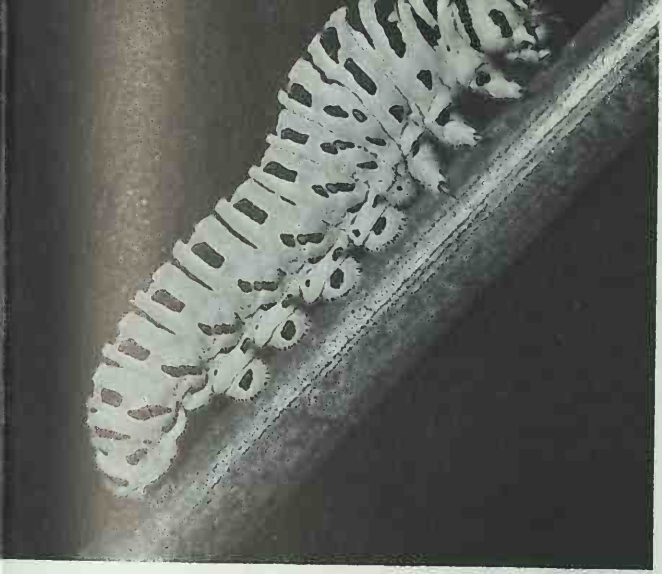


Figure 1.16
Réseaux trophiques dans un écosystème palustre : marécages littoraux à Salicornia *en Californie. D'après R.L. Smith,* Ecology and field Biology, *Harper and Row, 1966, p. 30*

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



1

2

3

4

5

Planche XI

Exemples de consommateurs primaires et secondaires

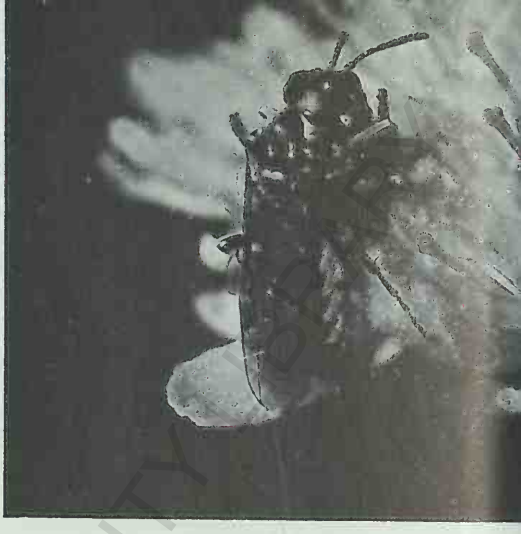
La chenille de lépidoptère (Papilio machaon) *représentée en (1) et la marmotte* (Marmotta marmotta) *représentée en (2), sont des consommateurs primaires (herbivores). La pie grièche* (Lanius collurio) *(3) et l'araignée* (Epeira diadema) *(4), sont des consommateurs secondaires (carnivores primaires). L'ours baribal* (Ursus americanus) *(5) occupe une place intermédiaire dans les chaînes trophiques car il possède un régime omnivore se nourrissant à la fois de végétaux, poissons et autres petites proies. (Clichés F. Ramade)*

Planche XII

Exemples de consommateurs tertiaires (superprédateurs)

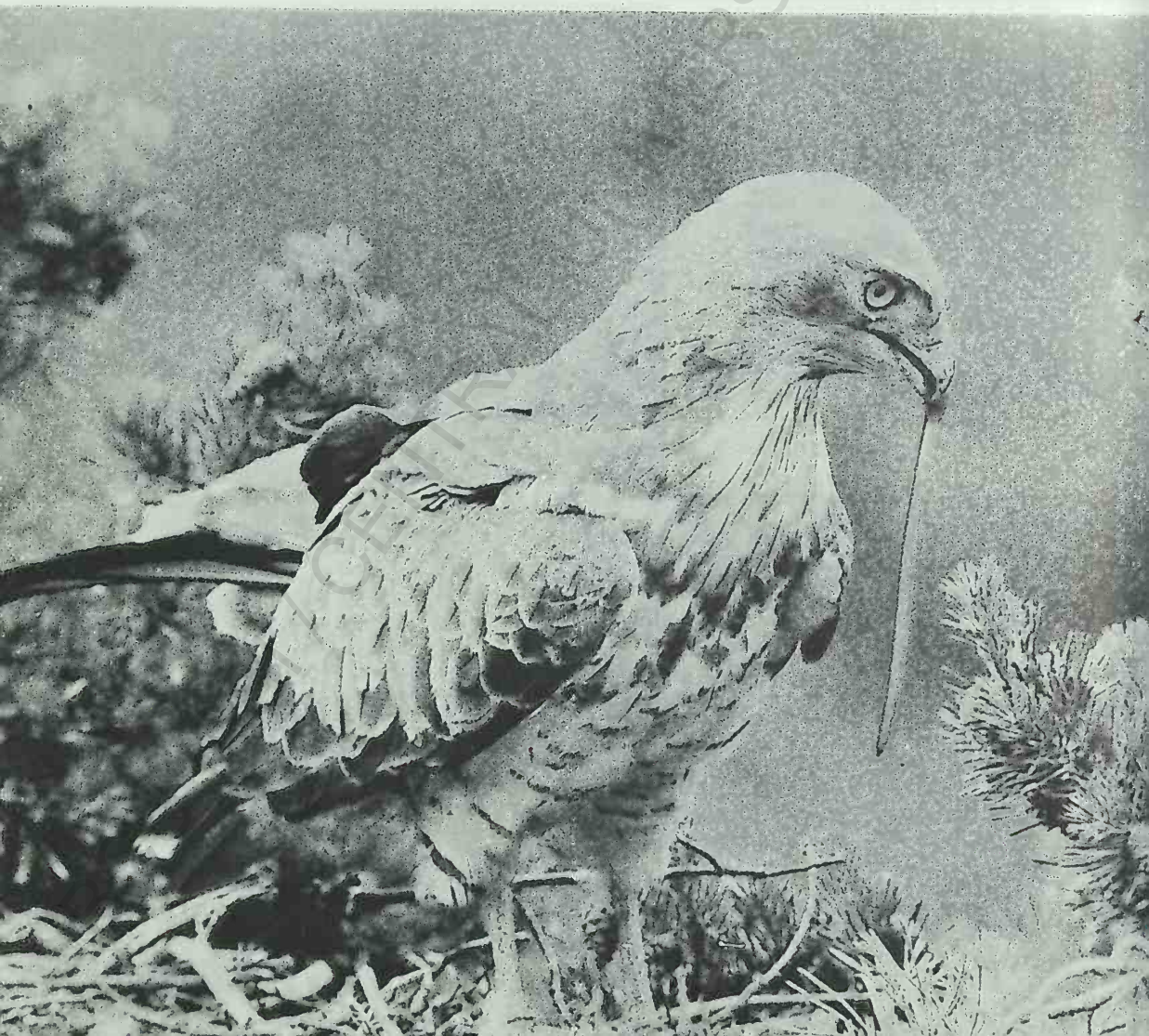
1) Tenthrède dévorant un Empide, Diptère à régime lui-même prédateur. Elle occupe donc ici la place d'un consommateur tertiaire (carnivore secondaire). (Cliché F. Ramade)

2) Circaète Jean-le-Blanc (Circaetus gallicus) *avalant un serpent. Le circaète est lui aussi un carnivore secondaire. (Cliché M. Brossolin)*



1

2



Circulation de la matière dans les écosystèmes — Les grands cycles biogéochimiques

L'interaction continue, qui s'exerce entre facteurs abiotiques et organismes vivants d'un écosystème, s'accompagne d'une circulation ininterrompue de matière entre biotope et biocœnose sous forme de substances alternativement minérales et organiques.

L'existence dans chaque communauté de groupes d'êtres vivants dont le métabolisme, donc les besoins, sont en grande partie complémentaires (producteurs, consommateurs, décomposeurs), permet un recyclage permanent des principaux éléments indispensables aux cellules vivantes (Fig. 1.17). Il existe de la sorte

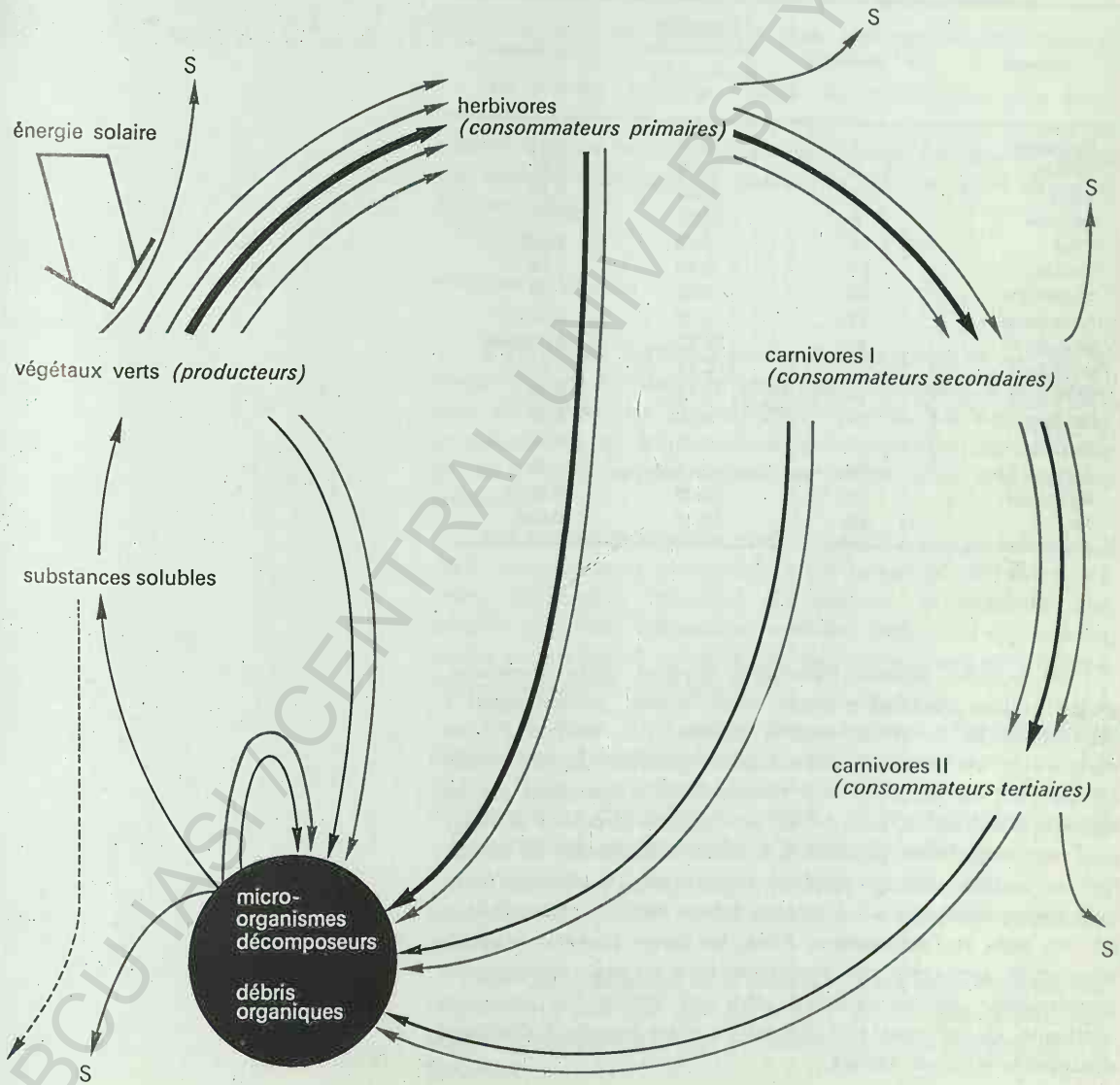


Figure 1.17
Schéma de la circulation de la matière (trait noir) et de l'énergie (trait grisé) dans un Ecosystème. (S = Entropie). D'après Lemée, Précis de biogéographie, *Masson, 1967, mais modifié*

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

une circulation cyclique de la matière dans chaque écosystème qui résulte de cette complémentarité écophysiologique entre autotrophes et hétérotrophes. Les diverses espèces de chacun de ces groupes d'organismes cherchent et absorbent sans relâche les substances indispensables à leur croissance, leur entretien, leur reproduction et rejettent dans le milieu des déchets minéraux et organiques plus ou moins complexes provenant de leur métabolisme.

Tableau III et fig. 1,17

Elément	*N° atomique*	*Lithosphère-Atmosphère Hydrosphère* %	*Corps humain* %
Hydrogène	1	0,95	9,31
Carbone	6	0,18	19,37
Azote	7	0,03	5,14
Oxygène	8	50,02	62,81
Fluor	9	0,10	0,009
Sodium	11	2,36	0,26
Magnésium	12	2,08	0,04
Aluminium	13	7,30	0,001
Silicium	14	25,80	négligeable
Phosphore	15	0,11	0,64
Soufre	16	0,11	0,63
Chlore	17	0,20	0,18
Potassium	19	2,28	0,22
Calcium	20	3,22	1,38
Manganèse	25	0,08	0,0001
Fer	26	4,18	0,005

De la sorte, carbone, hydrogène, oxygène, azote, phosphore, soufre et une trentaine d'autres corps simples, indispensables à l'édification de la cellule vivante (tableau III), sont sans cesse transformés en matières biochimiques (glucides, lipides, acides aminés etc.) ou absorbés sous forme d'ions inorganiques par les végétaux autotrophes, puis utilisés par les hétérotrophes : animaux puis microorganismes dégradeurs. Ceux-ci décomposent en dernier lieu les excreta, détritus végétaux et cadavres, en éléments minéraux hydrosolubles ou en composés gazeux qui retournent dans le sol, les eaux et l'atmosphère. Ainsi, les divers éléments biogènes circulent-ils sans cesse par dissolution dans les eaux continentales superficielles, qui les amènent dans les océans, ou entre les continents ou les mers et l'atmosphère, entre lesquels s'effectuent d'incessants échanges gazeux.

BAU WSU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

A l'échelle de la biosphère, on désigne sous le terme de *cycles biogéochimiques* ce passage alternatif des éléments entre milieu inorganique et matières vivantes et dont les diverses phases se déroulent au sein des écosystèmes.

L'existence de tels cycles confère à la biosphère un pouvoir considérable d'autorégulation (ou d'homéostasie) lequel assure la pérennité des écosystèmes et se traduit par une remarquable constance du taux des divers éléments présents dans chaque milieu.

On peut distinguer trois types majeurs de cycles biogéochimiques :

- le cycle de l'eau,
- le cycle des éléments à phase gazeuse prédominante,
- le cycle des éléments à phase sédimentaire prédominante.

Le premier implique l'étude des mouvements d'un corps composé : l'eau ; les autres le mouvement de corps simples qui passent sous des formes chimiques différentes, par suite de l'action des facteurs biologiques et géologiques, d'où le terme de cycles biogéochimiques.

CYCLE DE L'EAU

L'eau est un élément essentiel, indispensable à la vie. Quantitativement, elle représente le constituant inorganique le plus abondant dans la matière vivante. Chez l'homme, par exemple, elle constitue 63 % du poids corporel, cette proportion est de l'ordre de 80 % chez les champignons et atteint 98 % chez certains cnidaires.

Les graines de végétaux, dont la teneur en eau est inférieure à 10 %, correspondent précisément à des formes de vie ralentie. Le même phénomène, dénommé anhydrobiose, se rencontre chez certains invertébrés (nématodes, rotifères, tardigrades) qui peuvent perdre la plus grande partie de leur eau tissulaire sans périr lorsque l'environnement devient défavorable.

La biomasse à la surface des continents émergés est très sensiblement proportionnelle au volume des précipitations (Fig. 1.3 et 1.5). Enfin, nous verrons ultérieurement que l'eau comme source d'hydrogène et d'oxygène ne constitue qu'une faible fraction du volume total qui intervient dans le cycle hydrobiologique.

L'eau se rencontre dans les trois grandes régions de la biosphère : l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère et sous ses trois états.

Près des trois quarts de la surface terrestre sont recouverts par l'hydrosphère (soit 363 millions de km^2 sur un total de 510). Les océans représentent 97 % de la masse totale d'eau présente dans la biosphère.

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La répartition de l'eau est la suivante (selon Hutchinson, 1957).

Localisation ou forme	*Volume en 10^6 km^3*
Océan	1 380
Roches sédimentaires	210
Calottes glaciaires	16,7
Eaux souterraines	0,25
Eaux continentales de surface	0,025
Vapeur d'eau atmosphérique	0,013

Les chiffres ci-dessus n'ont qu'une valeur indicative et de nombreuses incertitudes demeurent. Des estimations plus récentes (Penman, 1970) fixent à 1 500 millions de km^3 le volume océanique global. Selon ces mêmes estimations, si l'eau présente sous ses différentes formes hydrogéologiques était uniformément répartie sur la surface terrestre, elle constituerait des couches d'épaisseur ci-contre.

Océan mondial	2 700 m
Calottes glaciaires	100 m
Eaux souterraines (nappes phréatiques)	15 m
Eaux douces superficielles	0,4 m
Vapeur d'eau atmosphérique	0,03 m

Malgré sa très faible valeur relative, c'est sur les 3 cm de hauteur représentés par toute la vapeur d'eau atmosphérique condensée qu'est fondée la circulation de l'eau et son cycle biogéochimique. En fait, l'eau atmosphérique est très inégalement répartie, ce qui explique les fortes variations de pluviométrie observées selon les régions de la biosphère. On estime que la quantité moyenne de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère est la suivante en fonction de la latitude : 2,5 mm au Pôle Nord, 10 mm à 45° N, 45 mm à l'équateur, 20 mm à 45° S et 8 mm au Pôle Sud (en supposant qu'elle soit entièrement condensée, pour une colonne de 1 cm^2 de surface).

Cette *humidité atmosphérique* provient de l'évaporation, sous l'effet du flux solaire, de l'eau des nappes liquides superficielles. Les masses d'air chargées de vapeur d'eau se déplacent tandis que celle-ci se condense en nuages. Leur refoidissement ramène cette eau à la surface du sol ou des mers sous forme de précipitations (pluie, neige ou grêle) et plus rarement par condensation sur des corps froids (rosée) (1). Les 7/9^e de leur volume total retombent à la surface des océans et les 2/9^e seulement sur les continents. La majeure partie du cycle de l'eau s'effectue donc entre océan et atmosphère.

(1) Dans certaines régions (Palestine et Ile Açores par exemple), le phénomène de rosé présente une importance certaine dans l volume total des précipitations annuelles e correspond à plusieurs centimètres d'eau (~ 40 mm en Israël).

Les eaux parvenues à la surface des continents peuvent suivre plusieurs voies différentes :

— la percolation (ou infiltration),

— l'évaporation (ou plus exactement l'évapotranspiration),

— le ruissellement.

Le premier phénomène joue un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres puisqu'il assure la réhydratation des sols, qui emmagasinent l'eau, en particulier dans les couches superficielles riches en humus et en matière vivante ; les mousses par exemple, jouent aussi un grand rôle dans les processus de rétention de l'eau

EDUMASTER CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

dans les sols forestiers. L'infiltration assure aussi l'alimentation des nappes phréatiques et des rivières souterraines. L'évapotranspiration constitue le phénomène opposé de l'infiltration. Certes, l'évaporation à la surface d'un sol joue un rôle important dans le régime hydrique local, mais les végétaux accélèrent beaucoup ce processus en transpirant des masses considérables d'eau par l'intermédiaire de leur système foliaire. En outre, leurs racines, qui peuvent atteindre plusieurs mètres de profondeur chez les arbres et autres végétaux ligneux, accélèrent ces mouvements ascendants de l'eau dans le sens sol-atmosphère. De la sorte, cette transpiration du couvert végétal vaporise chaque année des quantités d'eau considérables. Une culture qui produit 20 tonnes de matières végétales à l'hectare (poids frais) nécessite l'utilisation de 2 000 tonnes d'eau (au minimum).

La photolyse de la molécule d'eau, lors de l'assimilation chlorophyllienne, ne joue qu'un rôle négligeable dans ce phénomène. Dans l'exemple ci-dessus, pour 5 tonnes de poids secs produites sous forme de tissus végétaux, 3 tonnes d'eau seulement ont été nécessaires pour apporter l'hydrogène contenu dans ce poids total de substances organiques, soit à peine 0,15 % de la masse totale d'eau absorbée par la culture (Fig. 1.18 a).

(1) C'est d'ailleurs pour cette raison que les espèces du genre *Eucalyptus* quoique largement utilisées pour le reboisement dans des zones subdésertiques méditerranéennes ne sont pas écologiquement adaptées dans la mesure où elles augmentent l'aridité du milieu en allant, avec leurs racines pivotantes, chercher l'eau au niveau de la nappe phréatique. La forte évapotranspiration de ces arbres accélère en conséquence la déperdition d'eau de ces milieux !

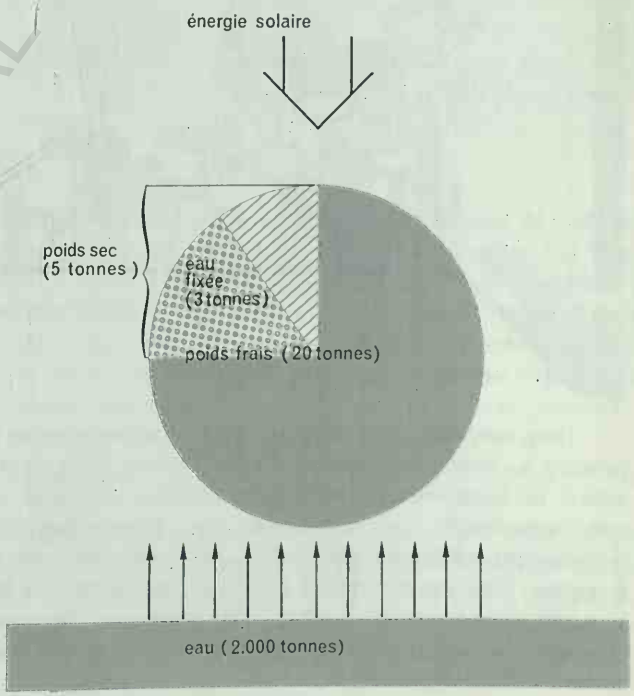


Figure 1.18a
Comparaison entre la proportion relative de l'eau évapotranspirée par une culture, celle transitant dans les tissus végétaux, et celle incorporée à la biomasse (photosynthèse). D'après Penman, Scientific American, Sept. 1970, p. 44

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La quantité d'eau transpirée par les plantes est d'autant plus élevée que leur alimentation en eau est meilleure. Un hectare de forêt évapore 20 à 50 tonnes d'eau par jour. Sur sol sec, (en Suède), un hectare d'épicéas transpire 2 100 tonnes d'eau par an contre 4 000 tonnes par an sur sol humide.

L'évapotranspiration, somme de la quantité d'eau transpirée par les plantes et évaporée par les sols, joue donc un rôle essentiel dans le cycle de l'eau sur les continents. Dans diverses zones forestières (bassin du Congo par exemple), on a pu montrer que la majeure partie de l'apport d'eaux pluviales est assurée par l'évapotranspiration, de sorte que le bassin vit en économie presque fermée (Duvignaud, 1961) (Fig. 1.18 b).

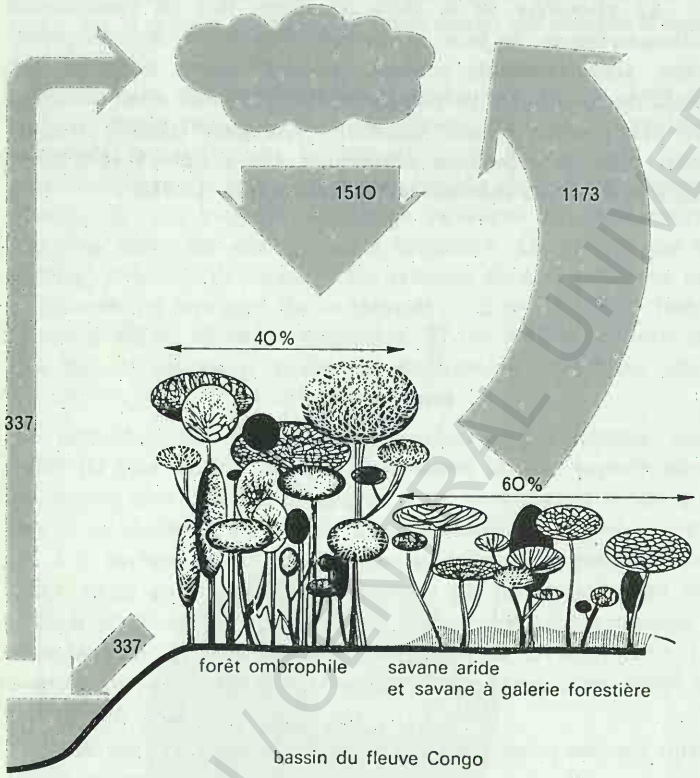


Figure 1.18b
Cycle de l'eau dans le bassin du Congo mon trant la prédominance de l'eau recyclée su place à partir de la quantité évapotranspirée pa rapport à celle amenée par les dépression venant de l'océan. D'après Duvigneaud, Ecosys tèmes et Biosphère, *Ministère de l'Educatio Nationale, Bruxelles, 1967, p. 8*

Dans certaines régions semi-arides, l'évapotranspiration est supérieure au montant annuel de la pluviométrie. Dans de tels cas, celle-ci est compensée par les apports d'origine extérieure, circulation superficielle ou souterraine. Ces phénomènes d'évapotranspiration atteignent une valeur maximale dans les déserts tropicaux (240 cm/an dans les marais de papyrus du Nil Bleu) et sous les climats méditerranéens (160 cm/an en Camargue). A l'opposé, ils sont négligeables dans les régions subarctiques (20 cm/an en Finlande par 60° N).

BCU - USI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

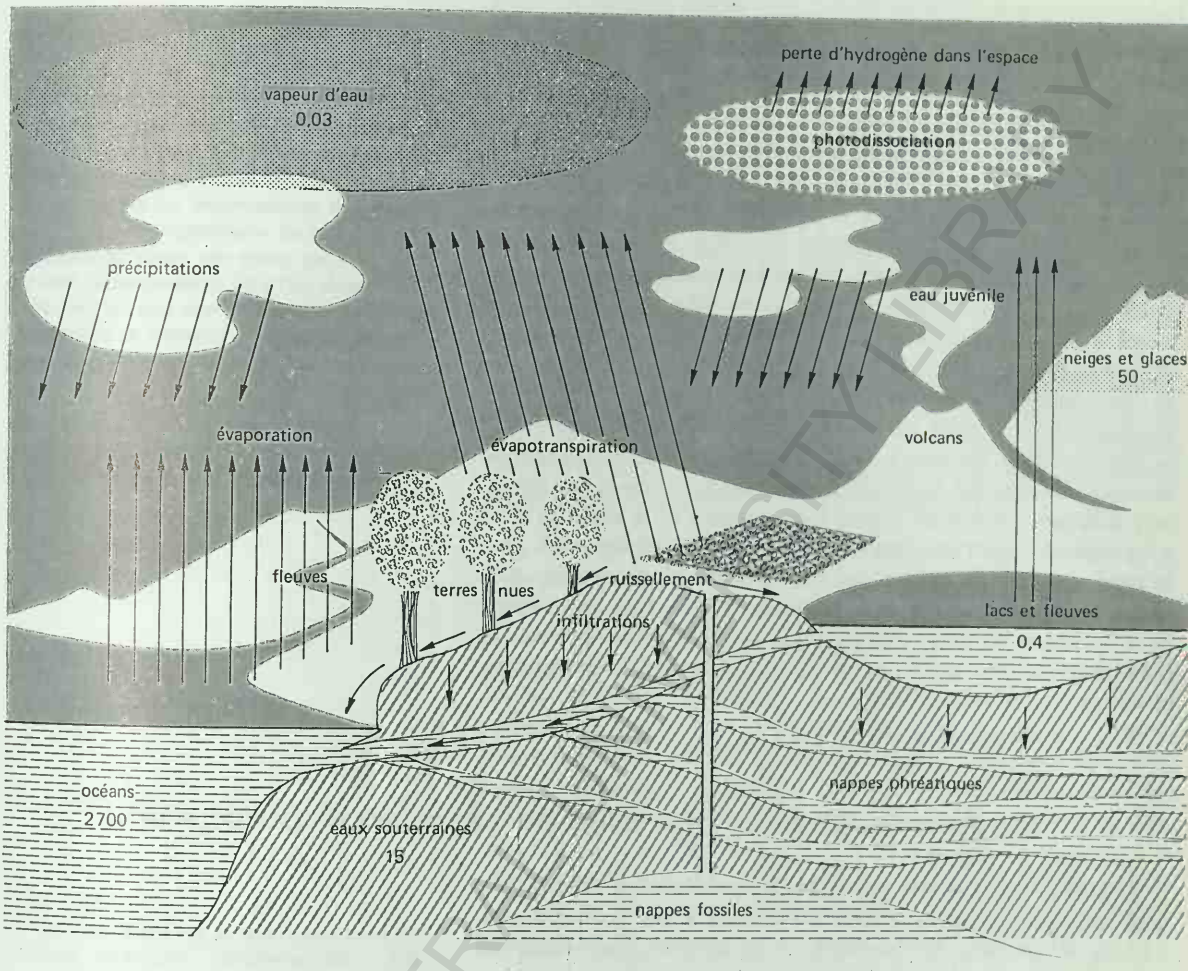


Figure 1.19
Schéma général du cycle de l'eau

Le ruissellement est le dernier agent du cycle de l'eau en milieu continental. Ce paramètre varie en sens inverses des deux précédents. Favorisé par la destruction du couvert végétal, il représente l'agent principal de l'érosion des sols. Ruissellement superficiel et résurgence des nappes souterraines assurent l'alimentation des cours d'eaux, lesquels restituent en dernier lieu l'eau à l'hydrosphère (Fig. 1.19).

CYCLE DU CARBONE

Le cycle du carbone s'effectue avant tout entre le gaz carbonique et les êtres vivants. C'est sans doute le plus parfait des cycles biogéochimiques, par suite de la grande vitesse à laquelle cet élément circule entre les divers milieux inorganiques et à l'intérieur des communautés d'êtres vivants, par l'intermédiaire des réseaux trophiques.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le carbone constitue l'élément biogène primordial. Il est présent dans la nature sous deux formes minérales prépondérantes(1), à l'état de carbonates, roches calcaires d'origine biogène qui constituent d'immenses dépôts dans certaines zones de la lithosphère, et surtout à l'état gazeux, de CO_2 (anhydride carbonique) qui représente la forme circulante du carbone inorganique. L'atmosphère renferme 320 ppm d'anhydride carbonique seulement. Malgré cette faible concentration, c'est aux dépens de ce gaz carbonique atmosphérique que les végétaux autotrophes assurent toute la production primaire des continents émergés. A l'échelle de toute la biosphère, cette production a été récemment estimée par Whittaker et Likens (1970) à quelque 164 milliards de tonnes par an de matières organiques sèches. Cela correspond à plusieurs dizaines de milliards de tonnes de carbone fixées annuellement par la photosynthèse. Comme le taux de gaz carbonique atmosphérique demeure constant en première approximation au cours du temps, cela suppose une grande mobilité du carbone et la présence d'un autre réservoir que l'atmosphère, lequel joue un rôle régulateur dans la circulation du gaz carbonique. L'océan représente ce réservoir : sa teneur en CO_2 dissous est équivalente à 50 fois la masse totale du CO_2 atmosphérique. Les échanges de CO_2 entre hydrosphère atmosphère et lithosphère se traduisent par l'ensemble de réactions suivantes :

CO_2 atmosphérique

$\downarrow\uparrow$

CO_2 dissous dans les eaux $\rightleftharpoons CO_2 + H_2O \rightleftharpoons CO_3H_2 \rightleftharpoons CO_3H^+ \rightleftharpoons CO_3 + 2H^+$

Dans les eaux continentales, cet acide carbonique dissous peut aussi attaquer les roches superficielles. Dans le cas des carbonates, comme le calcaire par exemple, il se produit une remise en circulation du calcium sous forme de carbonate acide, soluble dans l'eau :

$$CO_2 + H_2O + CO_3Ca \rightleftharpoons (CO_3)_2\,CaH_2$$

Ce dernier est amené dans les océans par les eaux superficielles de ruissellement où il sera reprécipité sous forme de calcite et d'aragonite dans la coquille ou l'exosquelette de nombreux invertébrés marins. Les immenses dépôts sédimentaires de divers carbonates proviennent de ce processus d'incorporation du calcium dans les formations squelettiques de divers animaux pendant de longues périodes géologiques.

Deux phénomènes biologiques fondamentaux conditionnent la circulation du carbone dans la biosphère : la photosynthèse et la respiration

L'anhydride carbonique atmosphérique et celui dissous dans les eaux constituent l'unique source de carbone inorganique à

(1) A de rares exceptions près, les hydrocarbures fossiles (pétrole, houille etc.), bien qu'ils représentent des masses considérables de carbone minéral, ne se rencontrent pas dans les roches superficielles et n'interfèrent pas, dans les conditions naturelles, avec le cycle du carbone. Ils correspondent au contraire à un épicycle qui s'est accompagné de la mise hors circulation, au cours des temps géologiques, d'une grande partie du carbone présent dans la biosphère. Nous étudierons plus loin les conséquences de la réintroduction de ce carbone fossile dans la biosphère par l'industrie moderne.

ROUAST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

partir de laquelle s'élaborent toutes les substances biochimiques constituant la cellule vivante grâce à l'assimilation chlorophyllienne. Si nous considérons l'équation photosynthétique et celle de la respiration dans le cas des glucides nous avons :

$$n\,CO_2 + 2n\,H_2O + N\ \text{kcal} \underset{\text{Respiration}}{\overset{\text{Photosynthèse}}{\rightleftharpoons}} nO_2 + n\,H_2O + [C_n(H_2O)_n]$$

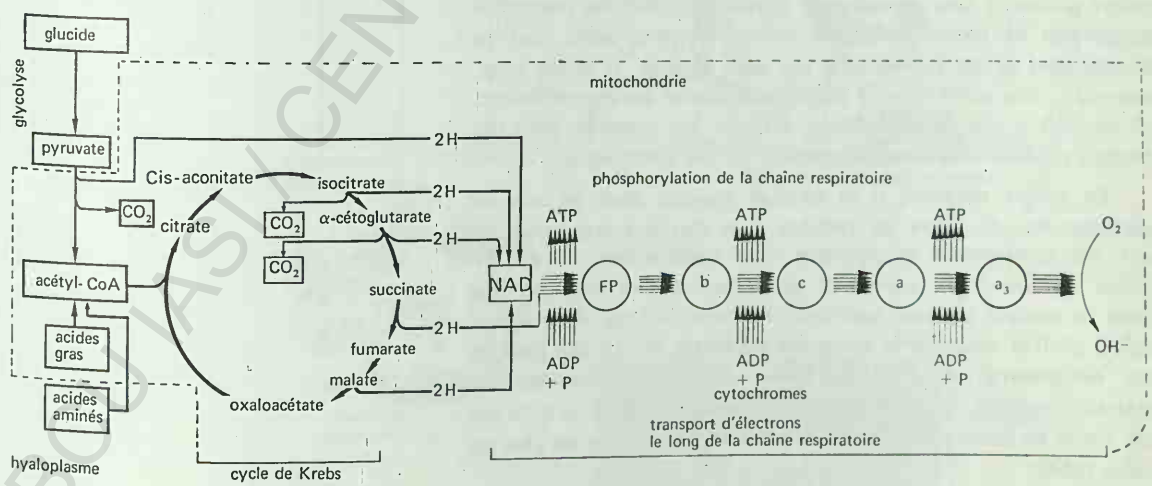
Monosaccharide

Les N kcal proviennent de l'énergie transportée surtout dans les bandes rouges du spectre solaire (photons dont la longueur d'onde est comprise entre 650 et 700 mμ) et captée par les pigments chlorophylliens.

Mais d'autre part, les êtres vivants, qu'ils soient autotrophes ou hétérotrophes, consomment de l'énergie pour réaliser le travail chimique et osmotique nécessaire à leur entretien, leur croissance et leur reproduction ainsi que le travail électrique (cellule nerveuse) et mécanique (mouvements) dans le cas des animaux.

Cette production d'énergie cellulaire est le fait de la respiration, phénomène antagoniste de la photosynthèse. Au cours de celle-ci, l'oxygène de l'air réagit avec l'hydrogène qui a été enlevé au substrat par divers systèmes enzymatiques. Elle comporte de nombreuses étapes intermédiaires au cours desquelles l'énergie libérée par cette dégradation du substrat (glucose par exemple) permet la synthèse d'un composé hautement énergétique, l'adénosine triphosphate (ou ATP), qui est impliqué dans tous les phénomènes métaboliques cellulaires. Celle-ci s'accomplit au cours des phosphorylations oxydatives, réactions couplées à la série de phénomènes d'oxydo-réductions qui se succèdent tout au long de la chaîne respiratoire. Par ailleurs, au cours de la dégradation aérobie du substrat se produit un dégagement d'anhydride carbonique (décarboxylations oxydatives du cycle de Krebs) (Fig. 1.20).

Figure 1.20
Principales étapes de la respiration cellulaire. D'après Lehninger, "Bioénergétique", Ediscience, 1969, p. 87.



BOUAST / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

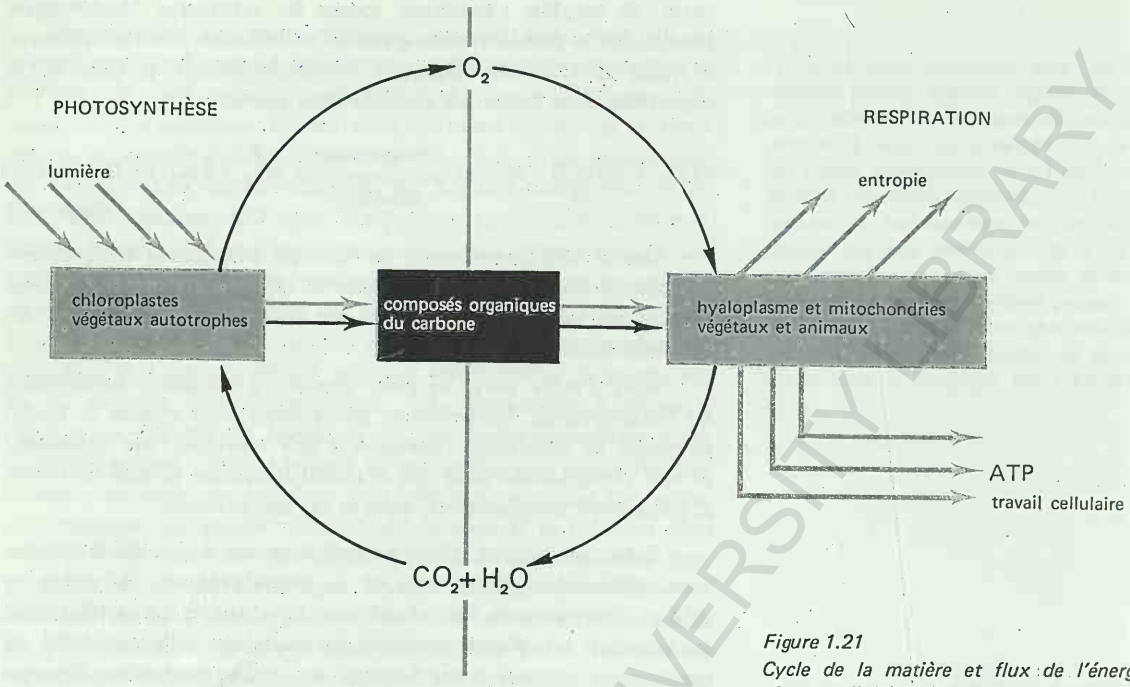


Figure 1.21
Cycle de la matière et flux de l'énergie au niveau cellulaire. Remarquer l'exacte complémentarité de la photosynthèse et de la respiration en ce qui concerne la circulation des éléments.

En définitive, la respiration aboutit à des effets rigoureusement opposés à ceux de la photosynthèse ; elle consomme de l'oxygène et dégage du gaz carbonique dans des proportions équimoléculaires (Fig. 1.21).

La respiration n'est pas seulement le fait des autotrophes et des hétérotrophes animaux. Dans chaque écosystème, les matières organiques ne sont pas entièrement utilisées dans les chaînes alimentaires de prédateurs. Détritus végétaux, plantes mortes, excreta et cadavres représentent une fraction importante des productions primaires et secondaires. Ces substances organiques résiduelles subissent une *dégradation oxydative,* dont les nombreux saprophytes et bactéries du sol sont les agents actifs, qui les décomposent et les minéralisent par voie aérobie. Il existe aussi, cependant, une autre voie de dégradation, celle des *fermentations,* qui conduit à une décomposition partielle des substrats dans des conditions anaérobies avec dégagement de gaz carbonique.

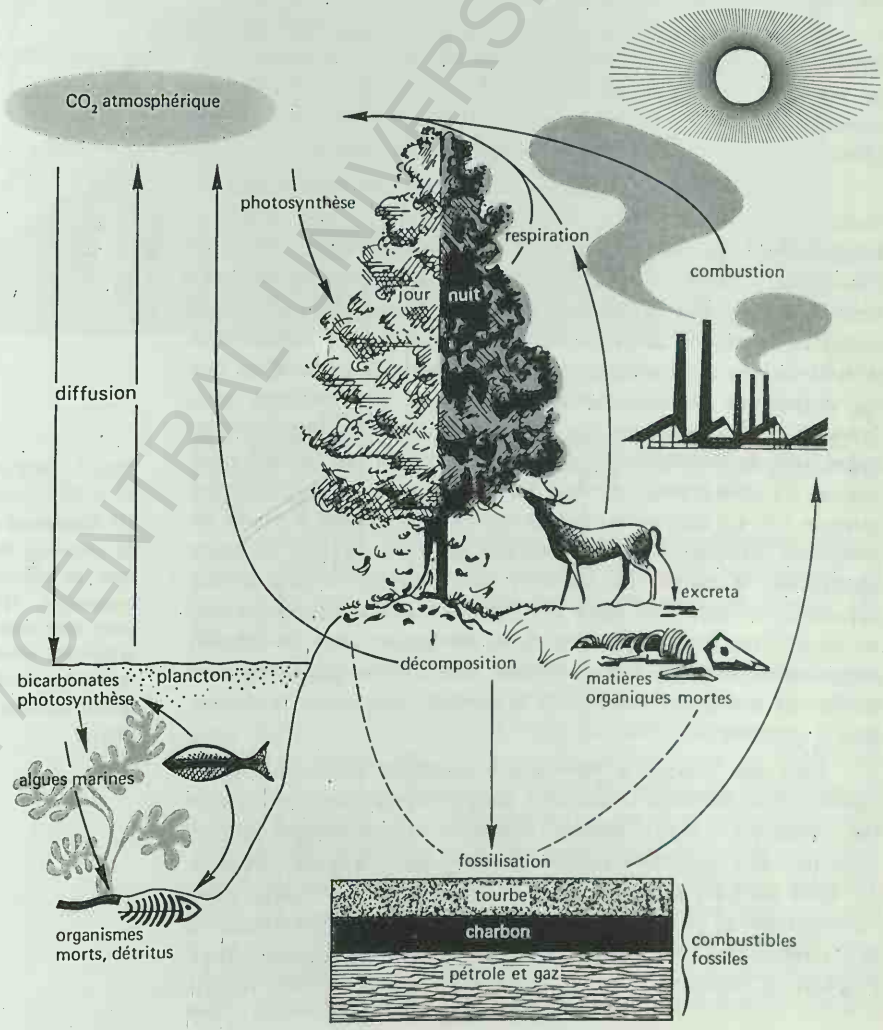
En milieu terrestre, il se produit souvent dans les sols un ralentissement du cycle du carbone. Les matières organiques ne sont pas entièrement minéralisées mais transformées en un ensemble complexe de composés organiques acides formant une masse de couleur sombre, que l'on dénomme *l'humus.* Associé aux argiles, celui-ci constitue le complexe absorbant du sol, qui joue un rôle fondamental dans la rétention et la circulation des sels minéraux nutritifs. C'est donc un agent essentiel de la fertilité des sols. Selon les écosystèmes, la minéralisation de l'humus est plus ou moins rapide.

BANARAS HINDU UNIVERSITY LIBRARY

Dans diverses circonstances, les matières organiques ne sont pas entièrement minéralisées par voie aérobie et s'accumulent dans diverses formations sédimentaires. Il se produit une stagnation, sinon un blocage du cycle du carbone, dont la formation de tourbe constitue un exemple actuel. C'est ainsi que, dans le passé, se sont constitués les formidables dépôts de charbon, de pétrole et autres hydrocarbures fossiles ou de calcaire en milieu aquatique, ce qui représente aussi une forme de stagnation du cycle du carbone.

L'ensemble de ces phénomènes correspond à un épicycle de la circulation générale du carbone dans la biosphère. Malgré l'importance considérable de celui-ci à certaines époques géologiques, attestée par l'existence des énormes formations sédimentaires précitées, il paraît négligeable aujourd'hui à l'échelle de la biosphère. En revanche, l'homme, depuis une date récente, a inversé le sens de ce phénomène puisqu'il utilise comme combustible des masses de plus en plus importantes d'hydrocarbures fossiles, ce qui enrichit l'atmosphère en gaz carbonique (Fig. 1.22).

Figure 1.22
Cycle biogéochimique du carbone. D'après Smith, op. cit.



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

On peut donc considérer, en conclusion, que depuis le début du quaternaire jusqu'à l'avènement de la société industrielle moderne, le cycle du carbone dans la biosphère était pratiquement parfait. La plupart de la production primaire annuelle était décomposée par la respiration des autotrophes et hétérotrophes et le gaz carbonique rejeté compensait de façon quasi rigoureuse la quantité de gaz carbonique retirée de l'atmosphère par la photosynthèse.

LE CYCLE DE L'OXYGENE

L'oxygène apparaît quantitativement comme le principal constituant de la matière vivante. Si l'on tient compte de l'eau présente dans les tissus, le corps humain par exemple renferme 62,8 % d'oxygène et 19,4 % de carbone. Si l'on se rapporte à l'ensemble de la biosphère, cet élément figure encore au premier rang des corps simples devant le carbone et l'hydrogène.

Le cycle de l'oxygène est fort compliqué, par suite de son aptitude à donner de multiples combinaisons chimiques et à se présenter sous diverses formes. Il en résulte l'existence de nombreux épicycles qui s'effectuent entre la lithosphère et l'atmosphère, ou entre l'hydrosphère et les deux autres milieux.

L'oxygène atmosphérique et de nombreuses roches superficielles (sédiments calcaires, dépôts ferrugineux) sont d'origine biogène. Nous avons vu plus haut que l'oxygène était absent de l'atmosphère terrestre primitive (cf. tableau I). Ce sont les organismes autotrophes qui l'ont élaboré. Les grandes formations antécambriennes de sesquioxyde de fer attestent de l'importante activité de ces organismes primitifs. On considère aujourd'hui que les organismes photosynthétiques archaïques ont précipité, sous forme d'oxydes ferriques, les ions ferreux présents dans l'hydrosphère afin de se débarrasser de l'oxygène qui ne représentait pour eux qu'un sous-produit de leur activité et en outre qu'un déchet toxique ([1]). La formation d'un écran d'ozone capable d'arrêter les radiations U.V. les plus dangereuses s'est produite dans la haute atmosphère à partir du moment où l'oxygène a atteint une concentration dans l'air égale à 1 % de son taux actuel. De ce fait, les eucaryotes autotrophes ont pu se développer dans les couches superficielles des eaux, là où le flux solaire est le plus intense ce qui accrut d'autant l'intensité de la photosynthèse donc la production d'oxygène.

Bien que l'oxygène moléculaire puisse se former par dissociation de la molécule d'eau dans la haute atmosphère, sous l'effet des radiations à haute énergie, l'oxygène atmosphérique peut en définitive être considéré comme d'origine essentiellement biogène. Le cycle de l'oxygène s'effectue d'ailleurs en majeure partie entre l'atmosphère et les êtres vivants (cf. Fig. 1.23). A sa production et son dégagement sous forme gazeuse lors de la photosynthèse, s'oppose sa consommation par les hétérotrophes lors de la respira-

(1) Rappelons en effet que l'oxygène, à parti de certaines concentrations, est très toxiqu pour les cellules et les tissus, même chez le organismes aérobies. D'autre part, Pasteu avait déjà montré au siècle dernier qu'aucu organisme anaérobie ne peut résister à un concentration d'oxygène supérieure à 1 % de s teneur actuelle dans l'atmosphère (Effet Pas teur).

BAUMSTARK UNIVERSITY LIBRARY

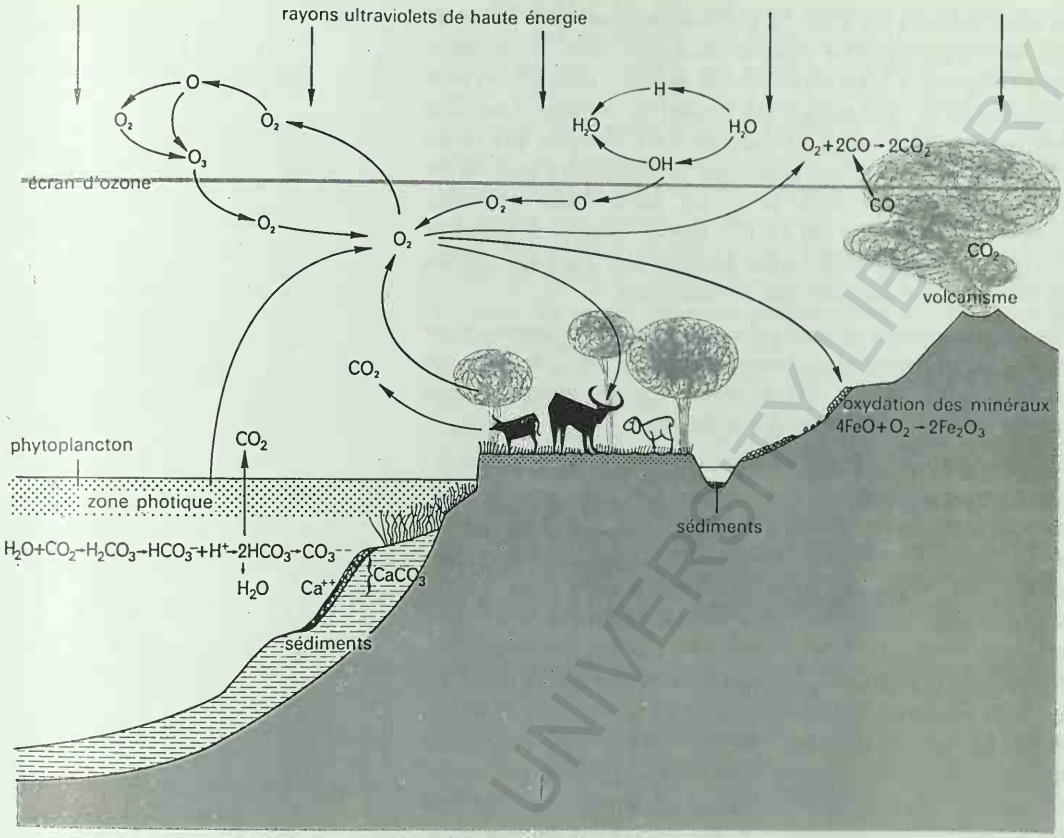


Figure 1.23
Cycle biogéochimique de l'oxygène. D'après Cloud, Scientific American, Sept. 1970, p. 63

tion qui conduit à la dégradation des molécules organiques et au transfert de l'oxygène sur l'hydrogène qui a été enlevé aux substrats avec formation d'eau.

Le cycle de l'oxygène apparaît donc en grande partie comme l'image inversée de celui du gaz carbonique, les mouvements de l'un s'effectuant dans le sens opposé de ceux de l'autre (cf. Fig. 1.21).

La consommation de l'oxygène atmosphérique et son renouvellement par les producteurs primaires s'effectuent à un rythme assez rapide. On estime actuellement que tout l'oxygène de l'air est recyclé en 2 000 ans. En revanche, il faut plus de 2 000 000 d'années pour que toutes les molécules d'eau de l'hydrosphère soient photolysées et resynthétisées par les êtres vivants. Quant à l'anhydride carbonique atmosphérique, son turn-over est assez rapide puisqu'il est entièrement renouvelé en 300 ans. Actuellement, photosynthèse et respiration, dans les conditions naturelles et si l'on exclut l'action de l'homme, sont rigoureusement équilibrées, de sorte qu'il ne se produit plus d'accumulation d'oxygène dans l'atmosphère et que le taux d'oxygène libre demeure constant.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il n'en a pas toujours été ainsi : le carbone accumulé sous forme de graphite et d'hydrocarbures fossiles, ainsi que dans la biomasse animale et végétale a pour équivalent le contenu total en oxygène des sédiments et de l'atmosphère. La plupart de la masse d'oxygène élaborée au cours des temps géologiques n'est d'ailleurs pas restée dans l'atmosphère mais a été fixée dans la lithosphère sous forme de carbonates, sulfates, oxyde de fer, etc. Cette masse représente 590×10^{14} tonnes contre 39×10^{14} tonnes d'oxygène circulant dans la biosphère, soit sous forme gazeuse, soit dans les sulfates dissous dans les eaux continentales et océaniques.

Il en est de même d'ailleurs du carbone dont la masse totale présente dans la biosphère, évaluée à 200×10^{14} tonnes, est supérieure d'un facteur 1 000 à celle circulant entre les êtres vivants, l'atmosphère, la lithosphère et les sols.

CYCLE DE L'AZOTE

C'est certainement un des cycles les plus complexes et les plus parfaits à la fois. Cependant, malgré le grand nombre et la diversité des organismes qui interviennent, il assure une circulation rapide de l'azote dans les divers écosystèmes. Cet élément suit dans une grande mesure le carbone avec lequel il est associé dans toutes les substances protéiques. Cependant, il en diffère par plusieurs points essentiels. En particulier, alors que les organismes vivent aux dépens d'une atmosphère riche en azote (et pauvre en gaz carbonique), cet élément, à la différence du gaz carbonique, ne peut être utilisé tel quel que par un nombre restreint d'organismes. En outre, alors que les produits de dégradation des composés carbonés sont finalement rejetés sous forme d'anhydride carbonique, il n'en est pas de même pour l'azote dont une faible quantité seulement est éliminée sous forme gazeuse. Enfin, l'intervention des êtres vivants dans le cycle de l'azote présente un haut degré de hiérarchisation : certaines catégories d'organismes et elles seules, sont aptes à intervenir à chaque phase de ce cycle. Le principal réservoir d'azote est l'atmosphère, qui en renferme 79 % en poids. L'azote gazeux y fait sans cesse retour sous l'action des bactéries dénitrifiantes, tandis que les bactéries fixatrices de ce gaz et les cyanophycées (algues bleues) en absorbent continuellement et le transforment en nitrates. En effet, si la formation de nitrates par voie inorganique s'effectue sans cesse dans l'atmosphère par suite des décharges électriques lors des orages, elle ne joue cependant qu'un rôle secondaire par rapport à celui des microorganismes nitrifiants. Ces derniers sont surtout représentés par des bactéries, certaines libres, comme les *Azotobacter* (aérobies) et les *Clostridium* (anaérobies) qui se rencontrent aussi bien dans les sols que dans les eaux, ou comme les *Rhodospirillum*, autres bactéries, autotrophes à la différence des précédentes.

BOLIVIAN CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Cependant, les plus puissants fixateurs de l'azote sont incontestablement les bactéries symbiotiques des légumineuses. A chaque espèce de ces végétaux est associée une bactérie particulière du genre *Rhizobium.* Ces microorganismes envahissent les tissus racinaires de leur plante-hôte en pénétrant par les radicules et provoquent la formation de nodosités par prolifération d'un tissu parenchymateux. Ils vivent en symbiose dans les cellules de celui-ci. La plante leur fournit les glucides dont ils ont besoin et elles lui apportent en contrepartie l'azote organique qu'elles synthétisent à partir de l'élément simple gazeux. Ces bactéries enrichissent ainsi en azote les parties aériennes des légumineuses (ce qui explique la haute teneur protéique de ces plantes et leur grande valeur nutritive) ainsi que le sol, car l'excédent d'azote nitrique formé diffuse au niveau de la rhizosphère. En outre, lorsque la plante meurt, les nodules se désagrègent et libèrent aussi dans le sol des quantités appréciables d'azote organique. Toutes les bactéries symbiotiques des légumineuses appartiennent au genre *Rhizobium,* lequel leur est inféodé et ne se rencontre nulle part ailleurs. Les *Rhizobium* peuvent fixer l'azote atmosphérique grâce à un système métabolique complexe renfermant du molybdène comme catalyseur et une hémoglobine (phénomène tout à fait exceptionnel dans le règne végétal).

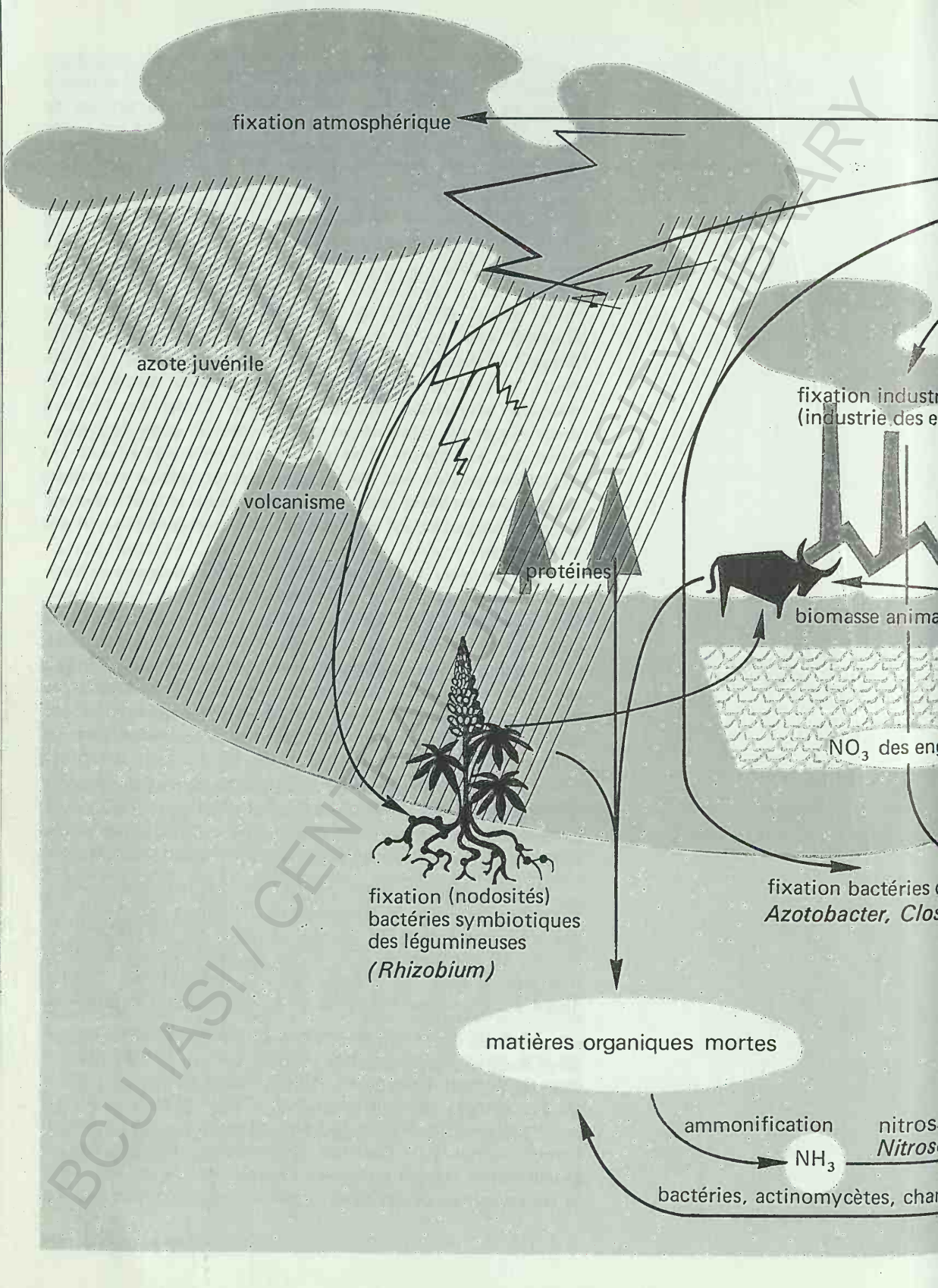
Les quantités d'azote organique ainsi élaborées par les *Rhizobium* et fixées dans les tissus des légumineuses sont considérables. On a pu relever jusqu'à 500 kg/ha/an dans des champs de trèfle, et cette quantité est souvent de l'ordre de 150 à 400 kg/ha/an. On estime actuellement que l'apport moyen d'azote nitrique d'origine abiotique aux sols par les précipitations est d'une dizaine de kg/ha/an, celui des bactéries libres est de 25 kg/ha/an, alors que celui des *Rhizobium* symbiotiques des légumineuses est en moyenne de 200 kg/ha/an.

En milieu aquatique, il existe aussi diverses espèces de bactéries nitrifiantes mais le rôle principal dans la fixation de l'azote atmosphérique est dévolu à plusieurs sortes d'algues bleues photosynthétiques des genres *Anabaena, Nostoc, Trichodesmum,* etc.

L'azote nitrique ainsi élaboré par ces nombreux microorganismes terrestres ou aquatiques est finalement absorbé par les végétaux, amené dans les feuilles et réduit par les $NADPH_2$ et $NADH_2$ en ammoniaque, grâce à une enzyme spécifique, la nitrate réductase. Ensuite, en présence d'acides carboxyliques, l'ammoniaque est finalement transformé en azote aminé puis en protéines.

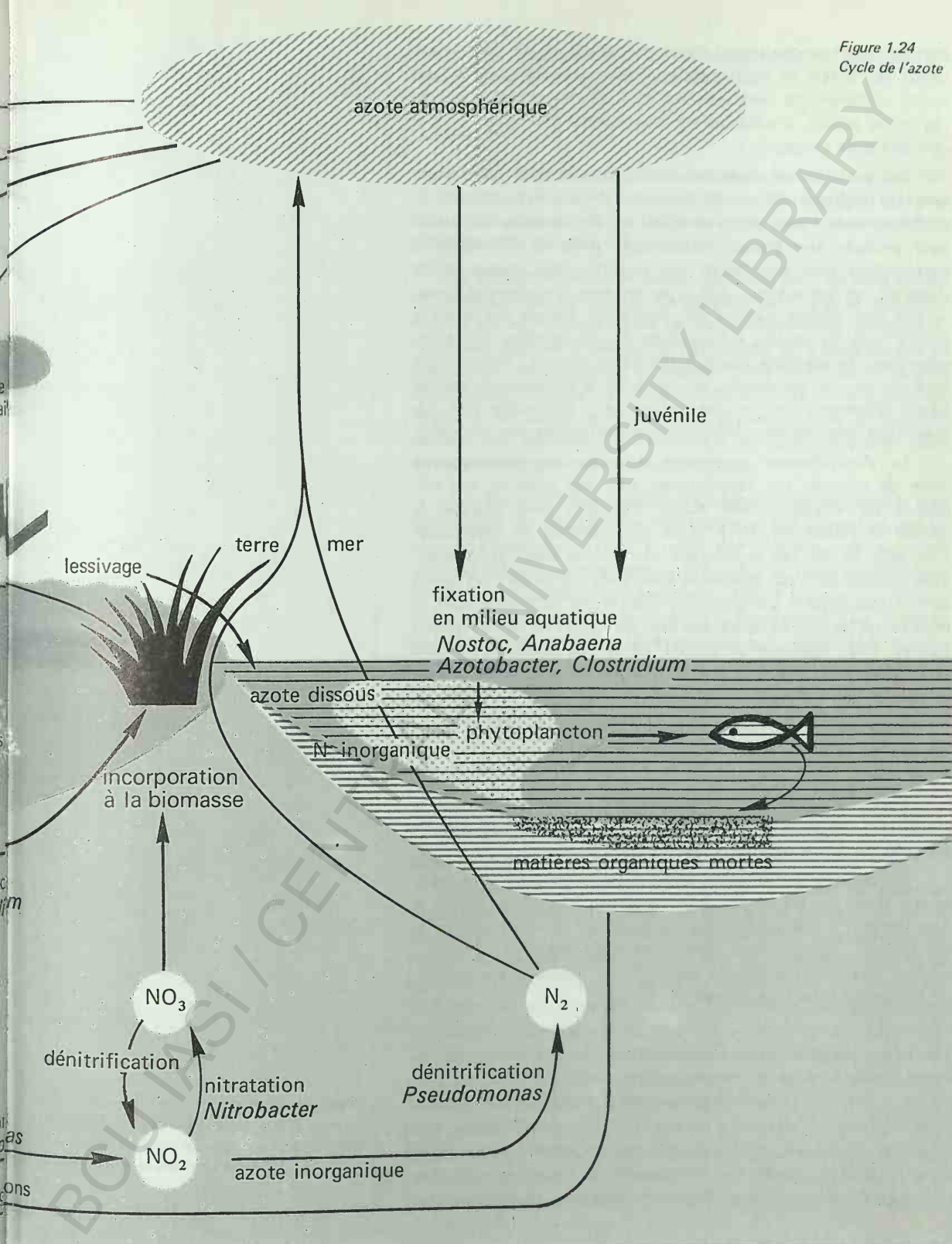
Le cycle de l'azote se poursuit au niveau des décomposeurs car une partie de cet élément contenue dans la biomasse est sans cesse restituée au milieu sous forme de détritus organiques, d'excreta, de cadavres. Les protéines et autres formes d'azote organique contenues dans ces déchets vont être attaquées par des microorganismes bioréducteurs (bactéries hétérotrophes, actinomycètes et champignons), lesquels produisent l'énergie dont ils ont besoin par la décomposition de cet azote organique qui, en dernier lieu, est

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITARA



BCU IASI / CENTRAL LIBRARY

Figure 1.24
Cycle de l'azote



BOU IASI / CEU UNIVERSITY LIBRARY

transformé en ammoniaque. Cette minéralisation de l'azote protéique est le fait de microorganismes souvent spécialisés. Certains agents ammonifiants sont capables d'utiliser des peptones et non des acides aminés, d'autres ne survivent qu'aux dépens de l'urée et non de l'acide urique,etc.

Une partie de cet azote ammoniacal peut pénétrer directement dans les végétaux au niveau racinaire et être retransformé en protéines, mais il peut aussi être utilisé par des bactéries nitrifiantes pour produire leur énergie métabolique. Ainsi les *Nitrosomonas* transforment l'ion ammonium, qui constitue leur unique source d'énergie, en ion nitrite $-NO_2-$ en présence d'oxygène et d'eau, ce qui leur fournit quelque 65 kcal/mole, énergie qui suffit à couvrir tous les besoins métaboliques de ces bactéries. En milieu océanique, la première bactérie nitrifiante connue, *Nitrosocystis oceanus*, est un autotrophe qui se suffit d'ammoniac — comme source d'énergie — et de gaz carbonique ; elle existe plus fréquemment dans les eaux pélagiques septentrionales que tropicales.

La *dénitrification* se produit dans les sols présentant un excès de nitrates. Les *Pseudomonas* sont des bactéries qui emploient les nitrates comme source d'oxygène pour dégrader le glucose et former de l'ATP. Elles sont capables de décomposer l'ion NO_3 en N_2 qui se volatilise et retourne dans l'atmosphère. Elles agissent dans des conditions anaérobies. La plupart des agents dénitrifiants arrêtent leur action au stade nitrite ou ammoniaque, la réaction du nitrate sur le glucose avec formation de nitrite, fournit quelque 595 kcal/mole de glucose, ce qui est largement suffisant pour subvenir aux besoins énergétiques de ces organismes dénitrifiants.

Il convient de préciser que, même dans les sols très riches en nitrates et carbone, seulement 20 % de l'azote total est ainsi décomposé.

Enfin, il existe des apports d'azote à l'atmosphère par le volcanisme qui compensent les pertes dues à la mise hors circulation d'azote par sédimentation au fond des abysses.

On constate en définitive que l'existence de nombreux paracycles, si elle est un facteur de complication du cycle de l'azote, a aussi conduit à une remarquable homéostasie dans la circulation de cet élément. Les processus majeurs de nitrification et de dénitrification sont magnifiquement adaptés pour répondre aux besoins de productivité des écosystèmes.

Les cycles biogéochimiques sédimentaires caractérisent tous les autres éléments biogènes. Nous n'en retiendrons que deux, celui du soufre et celui du phosphore à cause de leur signification métabolique : le premier par suite de son rôle dans l'établissement des structures protéiques, le second pour son importance considérable dans la mise en œuvre de l'énergie cellulaire ainsi que dans la constitution des molécules d'acides nucléiques. De plus, l'un et

KOHAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'autre sont impliqués dans divers phénomènes de pollution sur lesquels nous nous étendrons ultérieurement.

LE CYCLE DU SOUFRE

Malgré l'existence de divers composés gazeux du soufre, tels l'hydrogène sulfuré (SH_2) et l'anhydride sulfureux (SO_2), la majeure partie du cycle de cet élément est de nature sédimentaire et s'effectue dans les eaux et les sols.

La principale source de soufre disponible pour les êtres vivants est constituée par les sulfates. La solubilité dans l'eau de nombreux sulfates en fait l'unique forme de soufre élémentaire, inorganique, disponible pour les écosystèmes. Les sulfates sont absorbés par les plantes qui les réduisent et élaborent des amino-acides soufrés (méthionine, cystéine et cystine). On connaît le rôle essentiel dévolu à ces acides aminés dans l'établissement de la structure tertiaire des protéines, par formation de ponts disulfures entre diverses zones de la chaîne polypeptidique.

Les divers déchets organiques provenant des biocœnoses sont décomposés par des bactéries hétérotrophes qui libèrent en dernier lieu de l'hydrogène sulfuré à partir des protéines sulfurées restituées au sol. Par ailleurs, certaines bactéries du genre *Desulfovibrio* peuvent aussi produire de l'hydrogène sulfuré à partir des sulfates qu'ils réduisent dans des conditions anaérobies. Ces bactéries sulforéductrices sont des hétérotrophes qui utilisent les sulfates comme accepteur d'hydrogène pour libérer l'énergie métabolique dont ils ont besoin.

Les vases noires que l'on rencontre soit dans des conditions naturelles au fond de certaines mers (Mer Noire par exemple), de lacs et de diverses formations limniques continentales, soit après pollution par l'homme, sont riches en organismes sulforéducteurs capables de vivre dans des conditions entièrement anaérobies. Certains genres de bactéries, comme les *Beggiatoa,* sont même capables de réduire l'hydrogène sulfuré en soufre élémentaire.

Inversement, il existe des bactéries capables de réoxyder l'hydrogène sulfuré en sulfate, ce qui rend à nouveau le soufre disponible pour les producteurs. Ces bactéries sont dénommées chémosynthétiques, parce qu'elles sont capables d'obtenir toute leur énergie cellulaire non pas de la lumière mais par oxydation d'un composé chimique simple. Les *Thiobacillus* par exemple sont des bactéries autotrophes qui fixent le gaz carbonique en synthétisant toutes les substances biochimiques à partir de l'énergie produite par l'oxydation de l'hydrogène sulfuré en sulfates dans des milieux où règne une obscurité permanente ([1]). Fig. 1.25.

La dernière phase du cycle du soufre est entièrement sédimentaire. Elle implique la précipitation de cet élément dans des conditions anaérobies en présence du fer. Les diverses étapes de ce phénomène sont réversibles ce qui permet la réutilisation des

(1) Rappelons que les bactéries chémosynthétiques interviennent aussi dans le cycle de l'azote en oxydant par exemple l'ammoniaque en nitrites et ceux-ci en nitrates.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

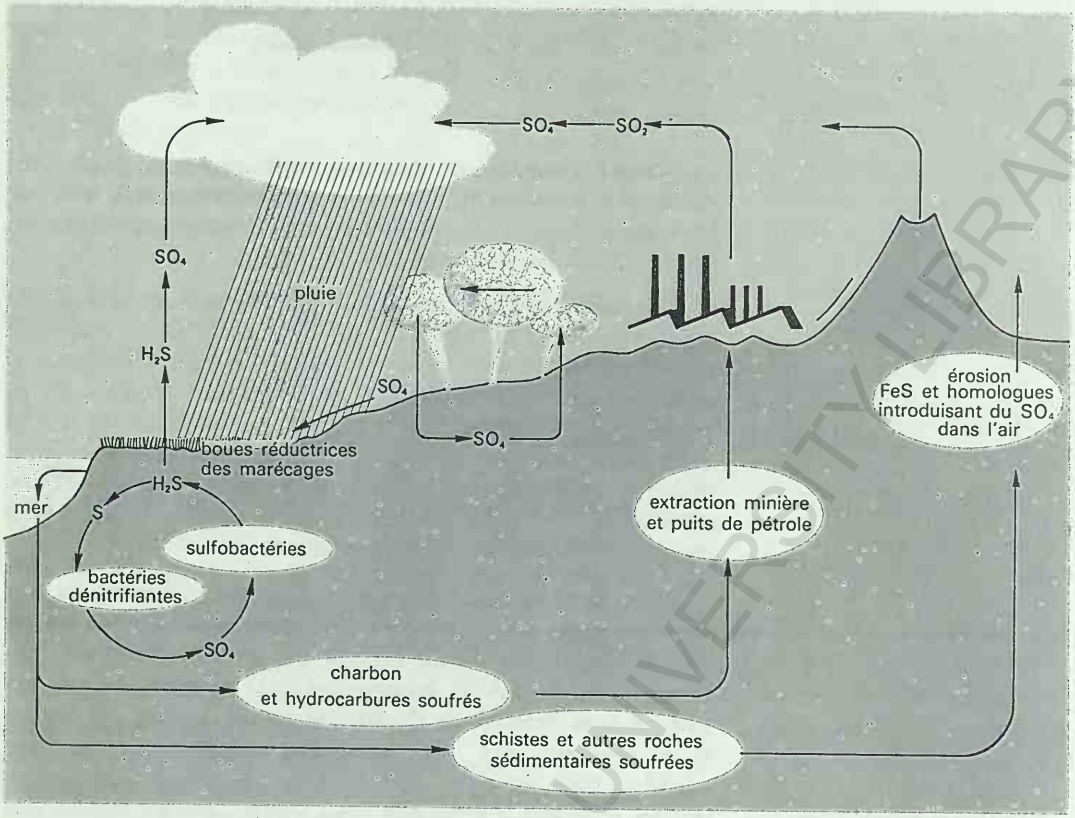


Figure 1.25
Cycle du soufre. D'après Colinvaux, Introduction to Ecology, *Wiley, 1973*

réserves sédimentaires ainsi constituées. On peut distinguer les réactions suivantes :

$$SH_2 + Fe_{+++} \rightleftharpoons Fe\begin{matrix}OH\\SH\end{matrix} \rightleftharpoons FeS \rightleftharpoons FeS_2$$

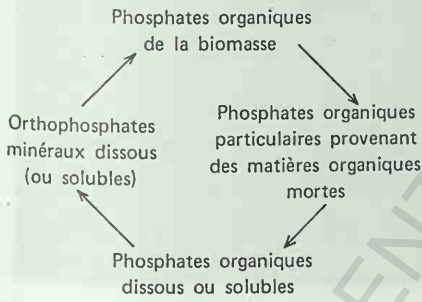
Le cycle aboutit donc finalement à l'accumulation lente et continue de soufre dans les sédiments profonds. Fait intéressant, on a pu montrer que la fixation du soufre dans la lithosphère par réaction avec des composés du fer s'accompagne d'une libération de phosphore, qui passe sous forme soluble. Nous avons là un exemple remarquable d'interrégulation de deux cycles biogéochimiques, le phosphore libéré devenant disponible pour les êtres vivants.

En définitive, les sédiments représentent la principale réserve de soufre dans la biosphère, lequel s'y rencontre surtout sous forme de pyrites mais aussi de sulfate (comme le gypse, par exemple). Mais il existe aussi un apport de soufre à la biosphère émis sous diverses formes gazeuses par l'activité volcanique. Celui-ci paraît toutefois assez faible par rapport à l'importance du stock sédimentaire.

BU DAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il est relativement simple et incomplet. Cet élément constitue par ailleurs un des composants essentiels de la matière vivante où il se rencontre à des taux relativement élevés : citons pour mémoire l'importance capitale au point de vue biologique de diverses molécules phosphorylées comme les nucléotides ou les phosphatidyl-lipides par exemple.

Le stock de phosphore disponible pour les êtres vivants est entièrement contenu dans la lithosphère. Les principales sources de phosphore inorganique sont constituées par des roches ignées, comme les apatites, et des dépôts de phosphates sédimentaires (phosphorites par exemple). Le phosphore minéral est, en définitive, un élément rare dans la biosphère dont il ne constitue que 1 % de la teneur totale en corps simples ; il tend de ce fait à devenir un facteur limitant primordial dans de nombreux écosystèmes dont il conditionne *ipso facto* la productivité. Ce phosphore inorganique est mis en circulation par lessivage et dissolution dans les eaux continentales. Il est ainsi introduit dans les écosystèmes terrestres et absorbé par les végétaux qui l'incorporent dans diverses substances organiques et le font ainsi passer dans les réseaux trophiques. Puis les phosphates organiques sont restitués au sol avec les cadavres, déchets et excreta produits par les êtres vivants, attaqués par les microorganismes et retransformés en orthophosphates minéraux, à nouveau disponibles pour les plantes vertes et autres autotrophes (fig. 1.26).



Le phosphore est introduit dans les écosystèmes aquatiques par les eaux de ruissellement. Les fleuves fertilisent sans cesse les océans par déversement perpétuel dans ces derniers de leurs eaux riches en phosphates. Elles permettent ainsi le développement du phytoplancton et des animaux situés aux divers niveaux des chaînes trophiques limniques ou marines. Là encore, le retour des phosphates minéraux à l'eau s'effectue par l'intermédiaire de bioréducteurs. Dans tous les écosystèmes aquatiques (ou continentaux) le phosphore se rencontre sous quatre formes différentes respectivement insolubles ou dissoutes.

Dans les eaux continentales des régions tempérées, on constate pendant la mauvaise saison un accroissement du taux de phosphates minéraux dissous. Le maximum de concentrations est atteint au printemps, période de l'année où les besoins en phosphore de la biocœnose sont les plus élevés (on remarque d'ailleurs la même variation temporelle du taux de nitrates dans les eaux). Le phosphore accumulé dans les sédiments peu profonds, c'est-à-dire les vases, est en effet libéré quand le milieu devient anaérobie, conditions qui apparaissent pendant l'hiver (arrêt quasi total de la photosynthèse). Ainsi, les conditions mêmes qui permettent l'accumulation du soufre en présence de fer en conditions réductrices et sa mise hors circuit assurent au contraire la libération de phosphates.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

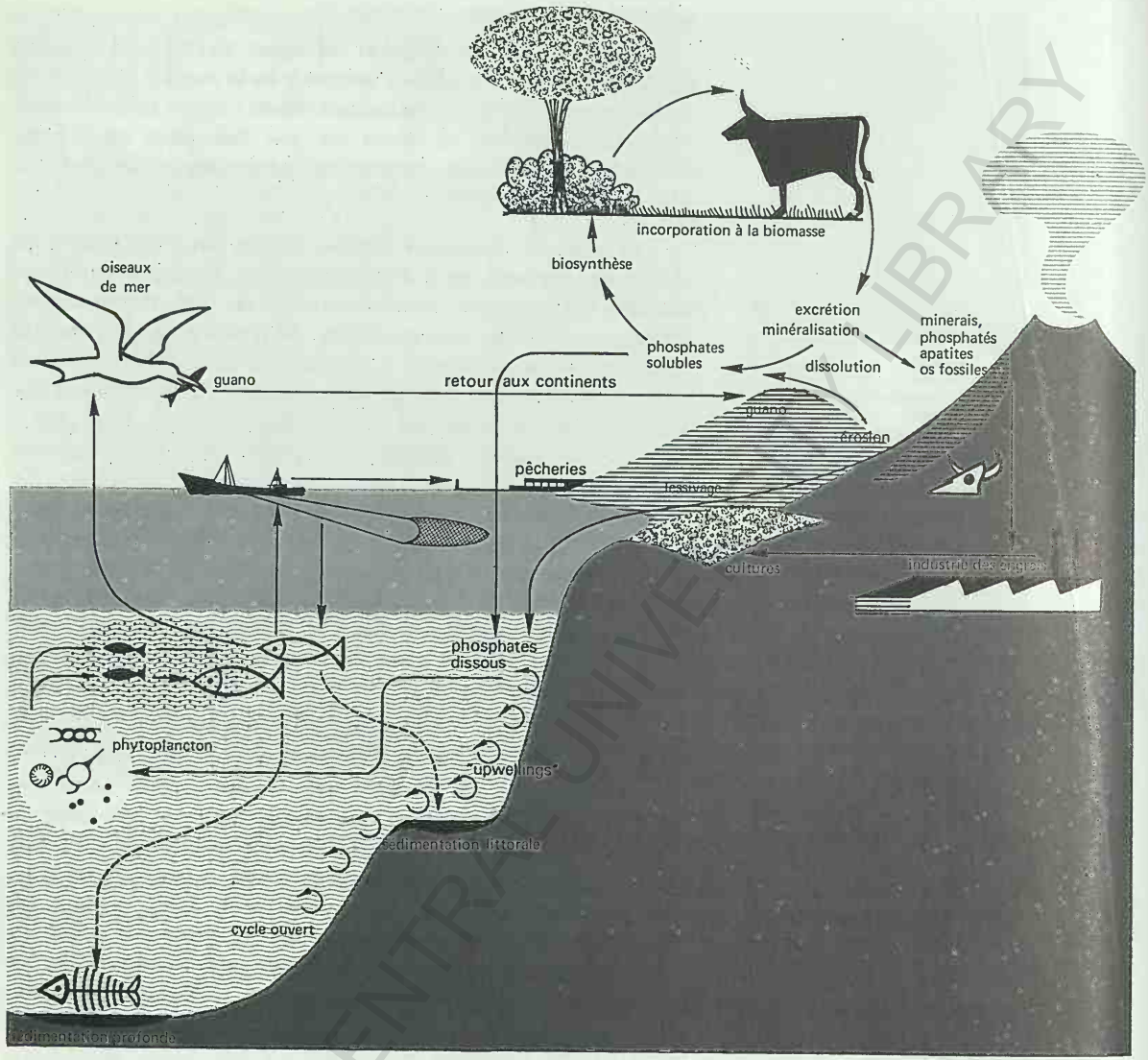


Figure 1.26
Cycle du phosphore. La

Malheureusement, on constate que le cycle du phosphore est incomplet et ouvert si l'on suit le cheminement de cet élément à l'échelle de la biosphère.

En effet, si le cycle du phosphore dans les écosystèmes terrestres s'effectue de façon optimale avec un minimum de pertes par lessivage dans les conditions naturelles ([1]), il n'en est pas de même dans les océans. Cela résulte de la sédimentation incessante des matières organiques et en particulier des cadavres de poissons, riches en phosphore, dont les fragments qui ne sont pas consommés par les détritiphages et les décomposeurs s'accumulent sans cesse au fond des mers. Alors que les phosphates organiques particulaires déposés en eaux peu profondes des zones intertidales

(1) La fossilisation des squelettes de vertébrés en milieu terrestre est un phénomène relativement rare dont l'impact sur le cycle du phosphore peut être considéré comme négligeable.

BCU VAUD / CENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

et néritiques peuvent être remis en circulation après minéralisation, il n'en est pas de même pour ceux qui se sédimentent au fond des zones abyssales. Or celles-ci représentent, rappelons-le, 85 % de la superficie océanique totale. Les phosphates déposés dans les grands fonds marins sont de la sorte retirés de la biosphère et ne peuvent plus être recyclés. Certes, comme le fait remarquer Kovda (1968), les éléments à cycle biogéochimique de type sédimentaire ne s'accumulent pas *ad infinitum* dans les fonds océaniques. La surrection des chaînes de montagne ramène très lentement à la surface des continents émergés les sédiments accumulés au fond des géosynclinaux. Cependant leur cycle, si tant est qu'il est fermé, s'effectue sur des périodes géologiques, c'est-à-dire sur des dizaines, voire des centaines, de millions d'années.

On peut certes considérer qu'à l'échelle de la biosphère et sur une période courte, le cycle du phosphore n'est pas entièrement ouvert. Il se produit en effet un retour partiel des phosphates des océans vers les terres émergées. Celui-ci s'effectue surtout par l'intermédiaire des oiseaux de mer ichtyophages. Les gisements de guano péruviens attestent de l'importance qu'a pu revêtir ce phénomène par le passé dans certaines zones continentales. L'homme contribue aussi, dans une certaine mesure, à ce recyclage en se livrant à la pêche d'animaux marins. La quantité de phosphore annuellement restituée aux terres par les pêcheries est cependant faible, de l'ordre de 60 000 tonnes par an selon Hutchinson (1957). Elle est nettement inférieure à celle entraînée dans l'hydrosphère par suite du lessivage des engrais phosphatés solubles que l'homme incorpore aux agro-écosystèmes et qui s'élève de nos jours à plusieurs millions de tonnes par an.

Il apparaît donc que, dans les conditions naturelles, les transferts de phosphore des océans aux continents sont tout à fait insuffisants pour compenser les pertes dues à la sédimentation. En outre, l'homme renforce de nos jours cette tendance naturelle par l'épandage de fertilisants phosphatés sur les terres cultivées.

La rareté du phosphore dans la lithosphère et l'importance de son rôle écologique rendent fort préoccupante l'action de l'homme sur son cycle biogéochimique.

Le phosphore constitue le principal facteur limitant pour les organismes autotrophes tant en milieu aquatique qu'en bien des biotopes terrestres. Cet élément contrôle ainsi la majeure partie de la production primaire de la biosphère. Il est fort probable, en conclusion, que le phosphore soit le grand régulateur de tous les autres cycles biogéochimiques. Le taux de nitrates dans les eaux ou d'oxygène dans l'atmosphère apparaissent en définitive contrôlés par le cycle du phosphore. Ainsi, comme le souligne Duvigneaud (1967), *"la situation pourrait devenir un jour angoissante car l'on peut écrire avec Wells, Huxley et Willes (1939) que le phosphore est le maillon le plus faible dans la chaîne de vie qui permet l'existence des hommes".*

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

LE FLUX SOLAIRE

Unique entrant énergétique dans la biosphère, il conditionne toute production de matière vivante car c'est de lui que dépend toute activité photosynthétique. En supposant toutes choses égales par ailleurs, l'assimilation chlorophyllienne en un biotope déterminé sera d'autant plus importante que la quantité totale de rayonnement solaire qui parvient au sol y sera plus élevée. C'est en effet ce que l'on observe dans les régions équatoriales des continents émergés (Fig. 1.36) où le flux lumineux présente une valeur élevée pendant toute l'année (Fig. 1.27).

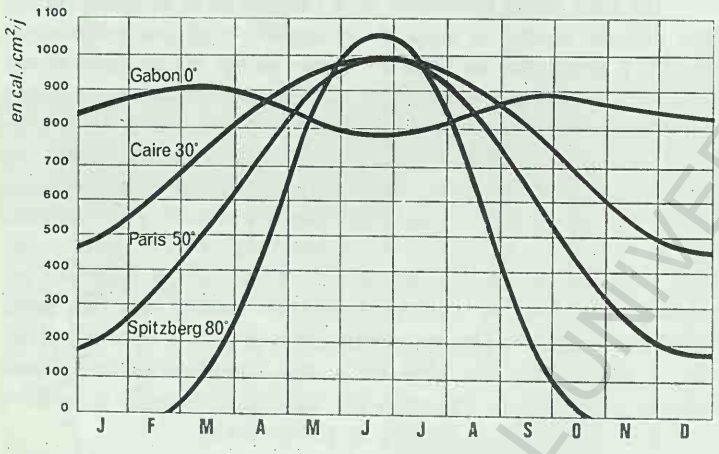


Figure 1.27
Distribution annuelle du flux solaire selon la latitude. En ordonnées sont figurées les quantités totales d'énergie solaire reçues journellement sur une surface horizontale tout au long de l'année à diverses latitudes. D'après Gates, Energy exchange in the biosphere, *Harper and Row, 1962*

Seule une fraction de la lumière solaire qui atteint l'environnement immédiat de notre planète (ionosphère) arrive à la surface terrestre.

Si l'on définit le flux solaire comme le taux d'énergie de toutes longueurs d'onde qui traverse une unité de surface par unité de temps, on peut l'évaluer à 2 cal/cm^2/mn dans la haute stratosphère. Fait remarquable, cette énergie est pour plus de 99 % concentrée dans une étroite bande spectrale de longueur d'onde comprise entre 0,2 μ et 4 μ, dont près de la moitié se situe dans le spectre visible (0,38 à 0,77 μ) et le reste est surtout compris soit dans l'ultraviolet proche, soit dans l'infrarouge.

Plus de 30 % du flux solaire qui atteint la haute stratosphère est directement réfléchi dans l'espace par l'atmosphère elle-même et les nuages ; 8 % l'est par les poussières en suspension dans l'air. De plus, 10 % du rayonnement global est absorbé par la vapeur d'eau, l'ozone et d'autres gaz.

Finalement, seuls 52 % des rayons solaires parviennent au sol. Mais à ce niveau se produiront encore des pertes par réflexion, de l'ordre de 10 % *(Albedo)* et près de la moitié seront utilisés comme source de chaleur dans les processus d'évapotranspiration

BUDAPEST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

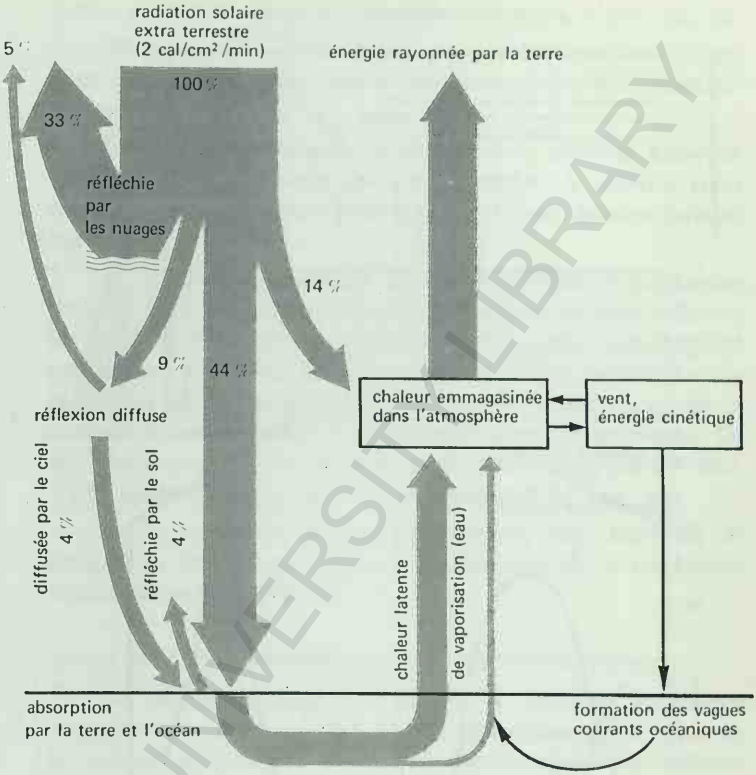


Figure 1.28
Schéma du bilan énergétique de la surface terrestre. Le flux qui accède au niveau du sol est amputé des quantités réfléchies, absorbées ou diffusées au cours de la traversée de l'atmosphère. Celles-ci interviennent dans l'ensemble des phénomènes qui mettent en mouvement les masses d'air et déterminent les courants océaniques (partie droite du schéma)

(Fig. 1.28). Enfin, sur les 40 % qui restent disponibles, à peine le quart est employé par les végétaux et stimule la photosynthèse.

En effet, la chlorophylle et autres pigments apparentés absorbent surtout l'énergie contenue dans les longueurs d'onde comprises entre 0,4-0,5 μ (bleu) et entre 0,61-0,69 μ (rouge) (cf. Fig. 1.29 a et b). On a pu évaluer qu'en réalité, seulement 10 % environ de l'énergie reçue par les plantes (dans le spectre visible) est réellement transformée en biomasse. Si l'on rapporte la quantité d'énergie convertie en substances organiques par les végétaux chlorophylliens au flux total qui atteint le sol, le rendement photosynthétique effectif apparaît très faible. Il est en général compris entre 0,1 et 1,6 %.

L'énergie capturée par les plantes représente donc en moyenne 1 % du flux lumineux global incident. Dans quelques rares cas, tels celui de cultures à haut rendement, on relève 3 %. Enfin, dans des conditions optimales, seulement réalisées en laboratoire, le taux de conversion du flux solaire en énergie biochimique peut dépasser 6 % chez certaines algues microscopiques (*Chlorella* sp., *Oscenedesmus* sp.). En réalité, si l'on tient compte de l'énergie transportée par la bande spectrale qui peut stimuler la photosynthèse, l'efficacité réelle de ce processus physiologique doit être estimée entre 2 et 6 %.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

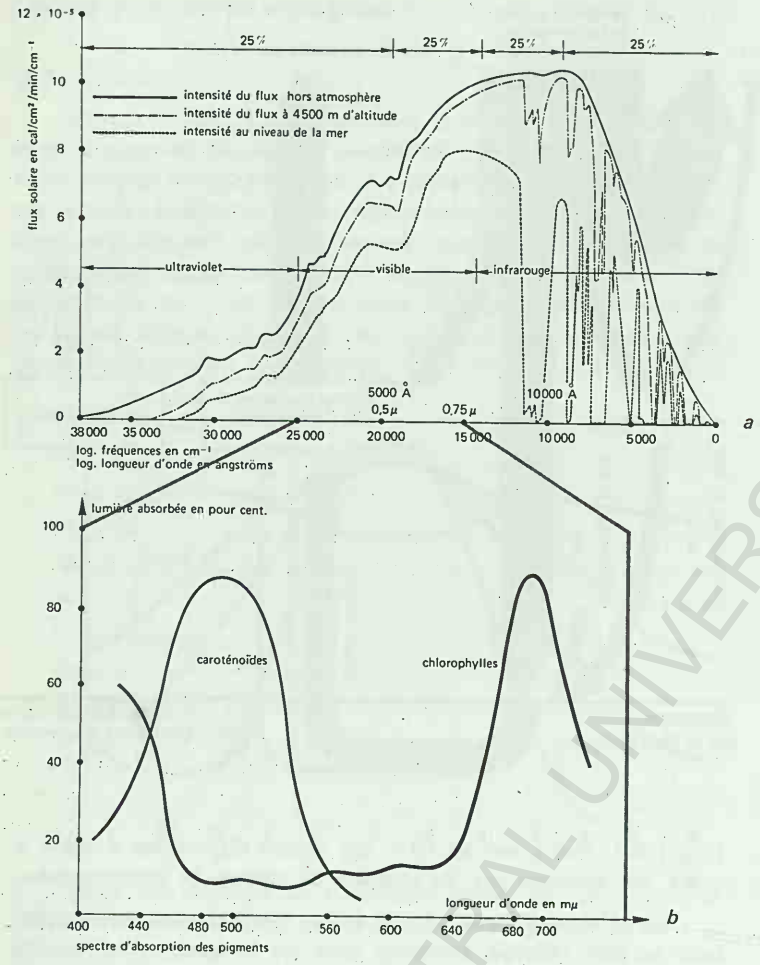


Figure 1.29

a Intensité du flux solaire au niveau de la mer et à diverses altitudes. D'après Geiger, The climate near the ground, *Harward University Press, 1966, p. 49*

b Spectre d'absorption des pigments de végétaux autotrophes (algues vertes)

c Spectre d'intensité de la photosynthèse correspondante. D'après Haxo et Blinks in *Berkaloff et coll.* Biologie et physiologie cellulaire, *Hermann, 1966, p. 141*

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

NOTION DE PRODUCTION ET DE PRODUCTIVITE PRIMAIRE

Le taux global d'assimilation photosynthétique des producteurs d'un écosystème est appelé *production primaire* ou *productivité primaire.*

La production primaire correspond à la *quantité totale* de matières organiques fixées par photosynthèse, y compris celles réutilisées par les plantes pour subvenir à leurs besoins métaboliques.

La productivité primaire se définit comme la production primaire d'un écosystème déterminé, calculée par unité de suface et par unité de temps. On peut estimer, par exemple, la productivité primaire en tonnes de matières organiques sèches synthétisées par hectare et par an. Une meilleure évaluation consiste à calculer la quantité d'énergie contenue dans ces substances biochimiques. On sait, par exemple, qu'un gramme de glucides correspond à 4 kcal, 1 g de lipides à 9 kcal, 1 g de feuilles vivantes à 4,7 kcal, etc.

De la sorte, la productivité primaire sera exprimée en $kcal/m^2/an$, ce qui permettra la comparaison de la production d'écosystèmes fort différents.

NOTION DE PYRAMIDE ECOLOGIQUE. EFFICACITE DES ECOSYSTEMES

Les réseaux trophiques présentent à l'intérieur de chaque écosystème une structure bien définie caractérisée par la nature et le nombre d'organismes présents à chaque niveau des diverses chaînes alimentaires. Celle-ci correspond à une valeur particulière du rapport "taille des individus/type de métabolisme" des diverses espèces qui constituent la communauté.

Par ailleurs, la circulation de la matière dans une biocœnose n'est qu'un reflet des incessants transferts d'énergies sous forme biochimique qui s'effectuent dans le sens

producteurs autotrophes $\longrightarrow$ hétérotrophes.

Le second principe de la thermodynamique nous enseigne en effet que, dans toute réaction énergétique, le rendement est toujours inférieur à 100 %. De ce fait, une chaîne trophique devra se caractériser par une diminution de l'énergie libre présente à chaque niveau trophique lorsque l'on s'élève dans cette dernière. Le métabolisme de toute communauté sera nécessairement conditionné par cette nécessité physique.

Les pyramides écologiques permettent de donner une représentation géométrique à la structure trophique d'un écosystème. Elles se construisent par superposition de rectangles de même largeur, mais de longueur proportionnelle à l'importance du paramètre mesuré. On peut ainsi obtenir des pyramides des *nombres,* des *biomasses* et des *énergies.*

Ces pyramides présentent deux caractères fondamentaux, quelle que soit la biocœnose dont elles représentent la structure trophique :

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

– leur hauteur sera proportionnelle à la longueur de la chaîne alimentaire considérée, c'est-à-dire au nombre de niveaux trophiques qu'elle renferme ;

– leur forme sera plus ou moins étalée selon l'efficacité des transferts d'énergie d'un niveau à l'autre. Plus le rendement des réactions thermodynamiques sera élevé, plus la quantité de matière biochimique présente aux niveaux successifs de consommation sera grande.

Les pyramides des nombres

Elles constituent l'approche la plus simple pour étudier la structure trophique d'un écosystème. On constate, en règle générale, qu'il existe dans chaque habitat plus de plantes que d'animaux, plus d'herbivores que de carnivores, plus d'insectes que d'oiseaux, etc.

Dans chaque communauté, et l'on ne rencontre aucune exception, les animaux de petite taille sont plus nombreux et se reproduisent plus vite. Par ailleurs, il existe pour chaque espèce de carnivore une dimension optimale de la proie. Pour des raisons physiologiques évidentes, le travail nécessaire pour capturer une masse suffisante de proies de faible taille n'est pas rentable. A l'opposé, les aléas de capture d'une proie trop grande dissuadent le carnivore.

On constate donc que le nombre d'individus présents décroît lorsque l'on passe d'un niveau trophique au suivant tandis que la taille augmente. On dénombre par exemple dans une prairie naturelle (Odum, 1959) 5 842 424 plantes par hectare (niveau trophique I), 708 624 insectes phytophages (niveau trophique II), 354 904 insectes prédateurs et araignées (niveau trophique III) et seulement 3 oiseaux (insectivores, niveau trophique IV).

Toutefois, on observe de nombreuses variations dans l'aspect de la pyramide des nombres, qui présente même parfois une forme inversée. Ainsi dans une forêt, on dénombre beaucoup moins d'arbres (producteurs primaires) que d'insectes (herbivores). Il en est de même pour les chaînes trophiques de parasites ou de saprophytes.

En définitive, les pyramides des nombres ne fournissent pas une représentation parfaite des relations trophiques dans une communauté car elles accordent une importance égale à tous les individus quels que soient leur taille ou leur poids.

Pyramide des biomasses

Elles reflètent mieux les relations trophiques dans un écosystème car elles expriment la biomasse (matière sèche) présente à un instant donné, à chaque niveau de la chaîne alimentaire. Sa forme est le plus souvent comparable à celle de la pyramide des nombres, (Fig. 1.30) c'est-à-dire un triangle, dont la pointe est

BU NASR / CONSTANTINE UNIVERSITY LIBRARY

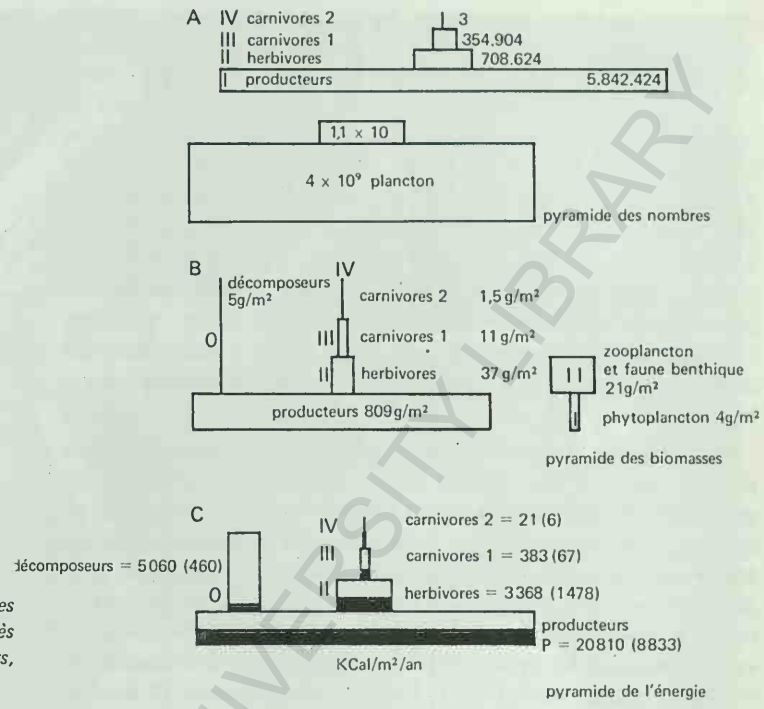


Figure 1.30
Pyramides écologiques. En C, les rectangles noirs figurent la production nette. D'après Odum, Fundamentals of Ecology, *Saunders, 1959, p. 63 et 65*

dirigée vers le haut, mais à base plus large en général car le rapport biomasse des producteurs/biomasse des consommateurs est souvent plus élevé que celui des nombres d'individus correspondants, bien qu'il existe des exceptions. Celles-ci sont fréquentes en milieu limnique où la production primaire est surtout assurée par des organismes microscopiques au métabolisme, donc à la vitesse de renouvellement, très élevés (biomasse faible, productivité importante).

Dans les lacs de montagne du Colorado, par exemple, le rapport biomasse zooplancton/biomasse phytoplancton est supérieur à un (selon Pennak, *in* Dajoz, 1971). Il en est de même dans les océans : on trouve dans la Manche une biomasse phytoplanctonique de 4 g/m^2 contre 21 g/m^2 pour le zooplancton et la faune benthique.

La pyramide des biomasses possède toutefois l'inconvénient de donner une importance égale à des tissus dont la composition chimique, donc la valeur énergétique, ne sont pas égales.

Pyramides des énergies. Efficacité des écosystèmes

Ces pyramides représentent le taux auquel s'effectuent les transferts d'énergie et (ou) la productivité dans les chaînes alimentaires. Elles s'établissent par calcul de la quantité de kcal accumulées par unités de surface et de temps et de celle dépensée par les organismes de chaque niveau trophique. S'il est assez facile de

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

déterminer la valeur énergétique des matières organiques stockées dans la biomasse, il est beaucoup plus complexe d'évaluer la quantité totale d'énergie réellement absorbée par chaque niveau trophique. Quand on adopte une telle représentation (Fig. 1.30) on constate que les décomposeurs, dont l'importance apparaît faible ou négligeable dans la pyramide des biomasses (il en serait à l'opposé dans celle des nombres) reçoivent une part appréciable du flux d'énergie qui traverse l'écosystème. En effet, une fraction seulement de ce flux est fixée dans les organismes de chaque niveau trophique et stockée dans la biomasse, le reste est dépensé pour assurer les besoins métaboliques des êtres vivants : entretien, croissance, reproduction. De plus, les animaux dépensent des quantités importantes d'énergie pour produire un travail musculaire.

Examinons maintenant plus en détail ce qu'il advient du flux d'énergie lorsqu'il traverse une chaîne trophique. Nous savons que seulement 1 % du flux solaire est réellement transformé en énergie chimique par les autotrophes (producteurs primaires). La quantité totale des matières organiques ainsi élaborées correspond à la *photosynthèse brute* (*PB*). Les végétaux vont dépenser une partie de cette énergie qu'ils ont convertie sous forme chimique pour assurer leurs propres besoins métaboliques ; celle-ci sera dissipée par la respiration des plantes (R_1). La *photosynthèse nette* (= production primaire nette) PN_1, correspond à la différence entre la photosynthèse brute et l'énergie perdue par la respiration (Fig. 1.31). Nous aurons la relation :

$$PN_1 = PB - R_1$$

Une fraction seulement de cette production nette sera disponible pour les herbivores et autre hétérotrophes : le reste, non consommé, correspondra à l'accroissement de la biomasse végétale stockée, b_1. La production disponible (P_d) sera liée aux autres paramètres de l'écosystème par la relation :

$$P_d = PN_1 - b_1$$

Les *herbivores* vont utiliser une partie de la productivité primaire disponible qui leur servira d'aliments (A_1), le reste, non utilisé par les consommateurs de l'écosystème, sera dégradé par les décomposeurs après être tombé au sol (NU_1). On peut ainsi écrire la relation suivantes :

$$A_1 = P_d - NU_1$$

La production nette des herbivores, encore dénommée production secondaire (PS_1), sera égale à la différence entre les aliments absorbés (A_1) et les pertes par respiration (R_2) et par excrétion (E_2). On désigne sous le sigle E, tous les produits du catabolisme et les aliments non assimilés, dont l'ensemble est parfois dénommé *rejecta*. Dans ces conditions, nous aurons :

$$PS_1 = A_1 - (R_2 + E_2)$$

BOLAND CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

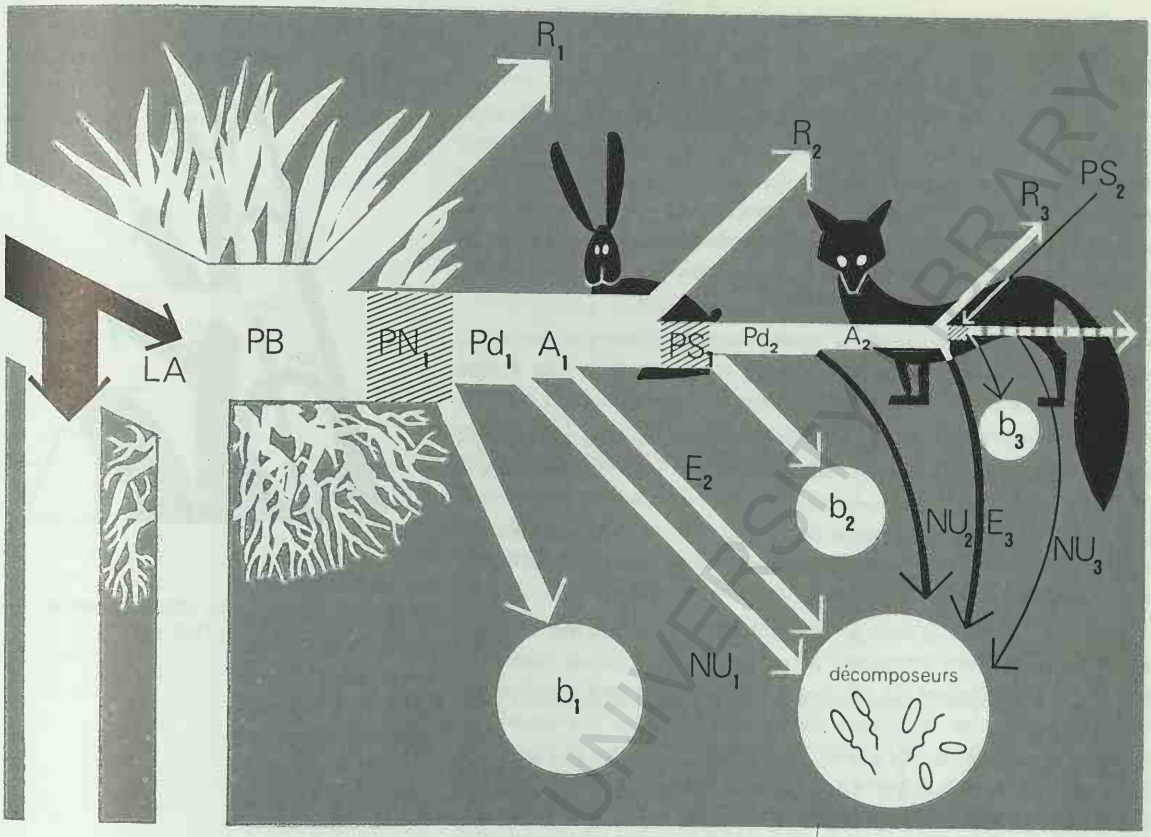


Figure 1.31
Schéma général des transferts d'énergie à l'intérieur d'une chaîne trophique simplifiée. On remarque la forte déperdition d'énergie à chaque niveau trophique, liée à la respiration et aux autres activités cataboliques. D'après Duvigneaud, op. cit.

Une partie de cette production secondaire correspond à l'accroissement de biomasse pour les herbivores (b_2) qui sont des consommateurs primaires mais seront considérés ici comme des producteurs secondaires (c'est d'ailleurs bien le cas en élevage), le reste est disponible pour les niveaux trophiques supérieurs (P_{d_2}). On peut alors écrire la relation suivante :

$$P_{d_2} = PS_1 - b_2$$

Les carnivores (consommateurs secondaires = 3e niveau trophique) vont à leur tour utiliser comme aliments (A_2) une partie de la production disponible, le reste non utilisé = NU_2, correspond aux cadavres d'herbivores qui vont aux décomposeurs.

Soit b_3 l'énergie fixée dans la biomasse des carnivores, R_3 celle consommée par leur respiration et E_3 celle perdue par excrétion, nous pouvons écrire les équations suivantes :

$$PS_2 = A_2 - (R_3 + E_3) \quad \text{et} \quad P_{d_3} = PN_3 - b_3$$

On peut ainsi de suite étendre le raisonnement à l'ensemble de la chaîne alimentaire jusqu'au *n*ième et dernier niveau trophique.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Si l'on superpose les diverses dépenses d'énergie effectuées à chacun de ces niveaux, on obtient une figuration plus complète de la pyramide trophique d'un écosystème (Fig. 1.32).

Si nous examinons maintenant le cas théorique et idéal d'un écosystème à maturité, dont la biomasse ne s'accroît plus et dans lequel n'existe ni importation ni exportation de la matière (recyclage parfait des éléments), nous constatons dans ces conditions que $P_d = PN$; en effet, il n'y a pas accroissement de la biomasse de chaque niveau trophique (c'est-à-dire que toute la production nette est disponible pour les autres hétérotrophes).

Dans un tel écosystème, toute l'énergie fixée par les autotrophes est entièrement consommée et dispersée sous une forme dégradée dans le milieu naturel (entropie).

Lindeman (1942) a proposé pour la première fois une loi du transfert de l'énergie dans les écosystèmes, que l'on appelle souvent "loi des 10 %" dans les ouvrages élémentaires. Celle-ci précise que seule une fraction de l'énergie qui pénètre à un niveau trophique donné dans une biocœnose, est transmise aux organismes situés à des niveaux trophiques supérieurs.

Cette fraction d'énergie disponible pour les autres hétérotrophes est souvent comprise entre 10 et 20 %. Il est facile de calculer en appliquant la loi des 10 % que la quantité d'énergie disponible pour les carnivores tertiaires (5^e niveau trophique) est tout au plus égale au 1/10 000^e de celle fixée par les producteurs. Les transformations d'énergie dans un réseau trophique se font donc avec un très mauvais rendement. Ceci explique pourquoi le nombre de maillons dans une chaîne alimentaire est nécessairement restreint, quelle que soit la biocœnose considérée.

Odum (1959) donne un exemple classique qui fournit une excellente illustration de l'importance des pertes énergétiques dans une chaîne alimentaire. Il a calculé la valeur des transferts d'énergie dans une chaîne trophique simplifiée à l'extrême, du type

luzerne ⟶ *veaux* ⟶ *enfant.*

Il s'est placé en effet dans le cas théorique où un enfant est strictement alimenté pendant un an avec de la viande de veaux qui ne se nourrisent que de luzerne.

Seulement 0,24 % du flux solaire baignant un champ de cette plante est fixé dans la production primaire (*PB*). Huit pour cent de cette production est consommée par les veaux et à peine 0,7 % de la biomasse des veaux assure le développement de l'enfant en une année (le rendement est faible car seule une partie de l'animal est consommable).

Odum montre ainsi qu'un millionième seulement du flux solaire initial est converti en biomasse de carnivore — en l'occurence assure l'accroissement du poids corporel de l'enfant — le reste est perdu, rayonné sous forme dégradée dans l'environnement. Cet

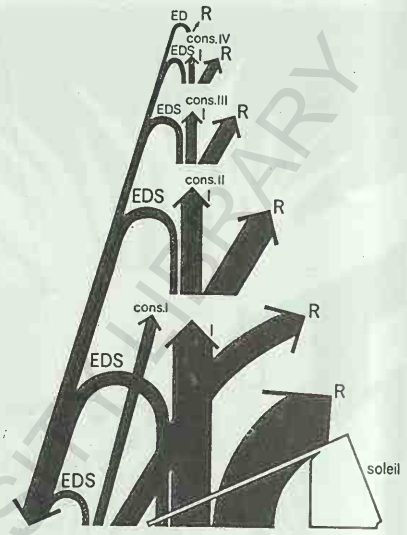


Figure 1.32
Pyramide des énergies. D'après Kendeigh, Animal Ecology, *Prentice Hall, 1963*

LAVAL UNIVERSITY CENTRAL LIBRARY

exemple illustre bien la très *faible efficacité écologique* des écosystèmes et le mauvais rendement de la conversion d'énergie dans les chaînes trophiques. De façon générale, on constate que si 1 000 kcal/j/m^2 sont fixées par les producteurs, 10 kcal/j/m^2 passent dans la biomasse des herbivores, 1 kcal/m^2/j dans celle des carnivores I.

Il est bien évident qu'au quatrième niveau trophique, seul un nombre restreint d'individus pourront subsister si l'on considère la faible quantité d'énergie disponible qui accède à ce niveau.

Il existe cependant d'importantes variations dans le règne animal. L'efficacité de la conversion d'énergie varie beaucoup d'une espèce à l'autre. Il faut par exemple 10 kcal d'aliments pour obtenir 1 kcal de bœuf mais seulement 5 kcal pour 1 kcal de porc et 3,5 kcal pour 1 kcal de poulet. Ces rapports, qui expriment le rendement énergétique de la croissance, sont fort importants pour le zootechnicien.

Par ailleurs, les animaux homéothermes ont un plus mauvais rendement que les poïkilothermes, car une bonne part de leurs besoins alimentaires servent à maintenir leur température corporelle à une valeur assez élevée et constante.

Diagramme général du flux d'énergie dans un écosystème

Les considérations précédentes nous permettent de dresser un diagramme du flux d'énergie dans une chaîne trophique. Ce type de schéma proposé pour la première fois par Lindeman (1942) consiste à figurer sous forme de rectangle ou de polygone de surface proportionnelle à son importance, la quantité d'énergie fixée dans la biomasse de chaque niveau trophique. Ceux-ci sont reliés entre eux par des bandes de largeur proportionnelle à l'intensité du flux d'énergie qui transite le long de la chaîne. En outre, d'autres bandes figurent les quantités perdues par respiration ou excrétées à chaque niveau (Fig. 1,33). Odum (1957) a proposé un diagramme général du flux d'énergie dans un écosystème. Il a utilisé pour la première fois ce type de figuration pour représenter le résultat de ses études sur les échanges d'énergie entre les divers organismes constituant la biocœnose des célèbres Silver Springs, en Floride.

Ces schémas consistent à introduire dans le diagramme général du flux d'énergie, d'une part la quantité totale de radiations lumineuses réellement absorbées par les plantes, de l'autre l'énergie importée et exportée par l'écosystème, ainsi que celle stockée dans le sol sous forme de détritus organiques qui ne sont pas immédiatement utilisés par les détritiphages et les décomposeurs (humus par exemple), et dans la biomasse (croissance des individus). On constate dans de tels diagrammes que la quantité totale d'énergie entrant par unité de temps dans l'écosystème est soit dégradée, soit exportée ou stockée. La somme des flux d'énergie perdue par

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

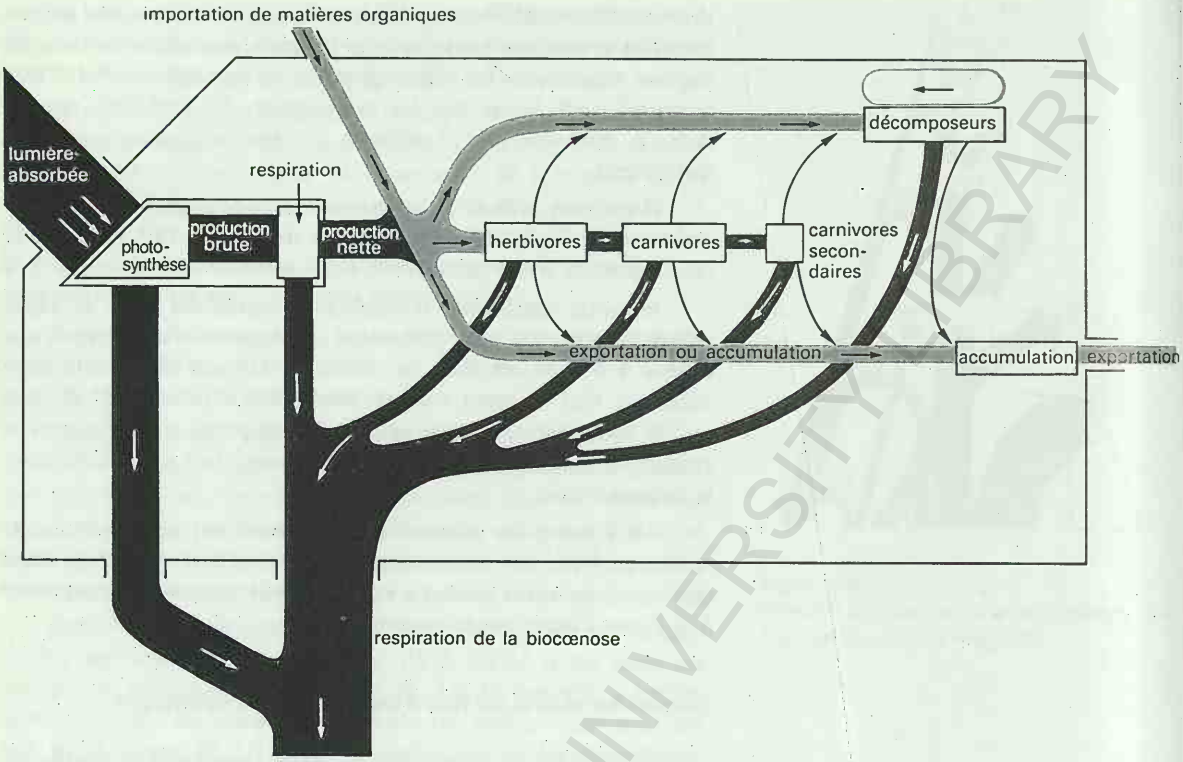
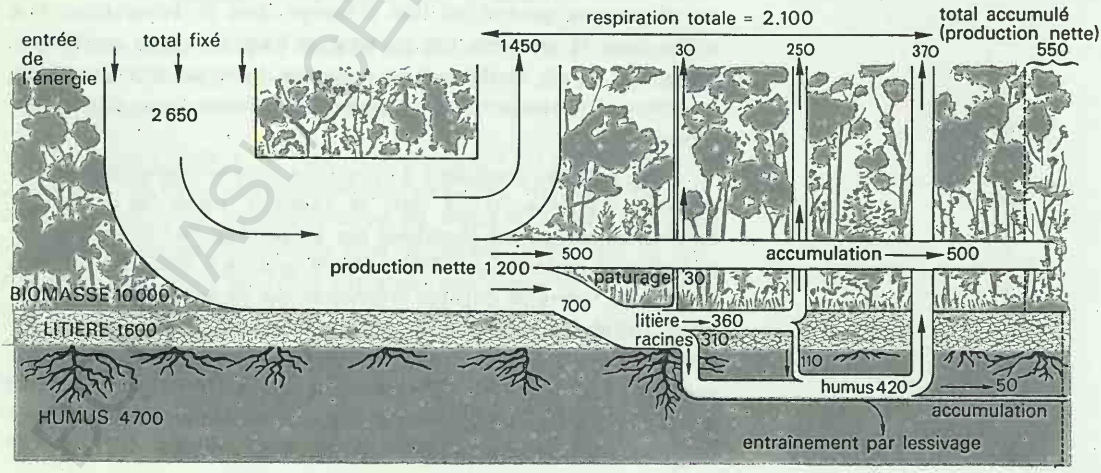


Figure 1.33
Diagramme général du flux de l'énergie dans un écosystème. D'après Odum, op. cit.

Figure 1.34
Flux d'énergie dans un écosystème forestier. Remarquer que la part de la production primaire nette utilisée par les herbivores est dérisoire par rapport à celle incorporée à la litière et l'humus. En effet, les chaînes trophiques de type détritiphage prédominent dans de tels écosystèmes. D'après Woodwell, Scientific American, sept. 1970.



MCGILL UNIVERSITY LIBRARY

respiration, accumulée dans l'écosystème et exportée est rigoureusement égale à celle fixée par photosynthèse.

L'aspect du diagramme de l'énergie varie beaucoup d'un écosystème à l'autre. Ainsi, en milieu marin, on constate qu'une grande partie du flux passe des producteurs aux consommateurs. La biomasse d'hétérotrophes est relativement importante par rapport à celle du phytoplancton. Au contraire, dans un écosystème forestier, le flux d'énergie s'écoule principalement dans le sens producteurs $\longrightarrow$ décomposeurs et la biomasse animale y est dérisoire par rapport à celle des végétaux (Fig. 1.34).

PRODUCTIVITE DES ECOSYSTEMES

Dans chaque écosystème, une partie du flux d'énergie qui pénètre dans le réseau trophique n'est pas dissipée mais stockée sous forme de substances organiques. Cette production ininterrompue de matière vivante (biomasse) constitue un des processus fondamentaux de la biosphère, dont l'importance décroît d'ailleurs au fur et à mesure que l'homme exerce une pression de plus en plus grande sur les ressources naturelles. C'est en effet cette productivité des écosystèmes qui assure le renouvellement de ces ressources.

On distingue une production primaire, quantité de matière élaborée par les végétaux autotrophes, et une production secondaire qui correspond à l'accroissement de la biomasse des consommateurs animaux.

L'une et l'autre s'estiment en kilogrammes de matières sèches produites, ou en grammes de carbone contenus dans cette dernière, ou en kilocalories, quantité d'énergie à laquelle ces biomasses sont équivalentes.

La production primaire brute correspond à la quantité totale de carbone fixée par les autotrophes, c'est aussi l'équivalent de la fraction du flux solaire utilisée par les organismes photosynthétiques. On l'estime à 1 % de la quantité totale d'énergie annuellement reçue par la terre, laquelle est de l'ordre de 5×10^{20} kcal/an. Nous savons qu'une partie des matières organiques ainsi élaborées sont utilisées par les végétaux pour leurs propres besoins métaboliques. Si l'on tient compte de ces pertes, on en vient à dégager la notion de production primaire nette *(Pn1)*, qui traduit la productivité du tapis végétal et du phytoplancton. De façon globale, cette productivité a été estimée, pour l'ensemble de la biosphère, par Whittaker et Likens (1970) à 164×10^9 tonnes de matières organiques sèches/an. Ce chiffre est supérieur, quoique du même ordre de grandeur, à l'évaluation faite antérieurement par Duvigneaud (83×10^9 t.m.s./an : 30×10^9 pour les océans et 53×10^9 pour les

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau IV — Productivité primaire, production nette et biomasse végétale des grands biomes (exprimée en tonnes de matière organique sèche) (d'après Whittaker et Likens in Lieth et Wittaker, 1975)

Type d'Ecosystème	*Surface* 10^6 *km²*	*Productivité primaire nette par unité de surface* $g/m^2/an$		*Production primaire nette mondiale* 10^9 *t/an*	*Biomasse par unité de surface* t/ha		*Biomasse mondiale* 10^9 *t*
		gamme normale	*moyenne*		*gamme normale*	*moyenne*	
Forêts ombrophiles tropicales	17.0	1 000-3 500	2 200	37.4	60-800	450	765
Tropicale caducifoliée	7.5	1 000-2 500	1 600	12.0	60-600	350	260
Forêt tempérée de conifère	5.0	600-2 500	1 300	6.5	60-2 000	350	175
Forêt caducifoliée tempérée	7.0	600-2 500	1 200	8.4	60-600	300	210
Forêt boréale (Taïga)	12.0	400-2 000	800	9.6	60-400	200	240
Formations arbustives et buissonnantes	8.5	250-1 200	700	6.0	20-200	60	50
Savannes	15.0	200-2 000	900	13.5	2-150	40	60
Toundra	8.0	10-400	140	1.1	1-30	6	5
Déserts et semi-déserts buissonnants	18.0	10-250	90	1.6	1-40	7	13
Déserts extrêmes, zones polaires	24.0	0-10	3	0.07	0-2	0.2	0.5
Agroécosystèmes	14.0	100-3 500	650	9.1	4-120	10	14
Marécages	2.0	800-3 500	2 000	4.1	30-500	150	30
Lacs et fleuves	2.0	100-1 500	250	0.5	0-1	0.2	0.05
Total des continents	149		773	115		123	1 837
Océan (au large)	332.0	2-400	125	41.5	0-005	0.03	1.0
Zones d'Upwelling	0.4	400-1 000	500	0.2	0.05-1	0.2	0.008
Plateau continental	26.6	200-600	360	9.6	0.01-0.4	0.1	0.27
Récifs coraliens et herbiers d'algues	0.6	500-4 000	2 500	1.6	0.4-40	20	1.2
Estuaires	1.4	200-3 500	1 500	2.1	0.1-60	10	1.4
Total océanique	361		152	55.0		0.1	3.9
Total général	510		333	170		360	1 841

biomes terrestres). Loin d'être uniforme, la productivité primaire varie beaucoup selon les écosystèmes. Le tableau ci-dessus rapporte la valeur de cette dernière, évaluée dans diverses régions de la biosphère.

Les données de ce tableau nous montrent l'importance des variations de productivité observées selon l'écosystème.

Ainsi, la productivité des déserts et des zones pélagiques des océans est particulièrement faible, inférieure à 200 g de m.s./m^2/an et les eaux bleues superficielles des mers tropicales, pauvres en éléments nutritifs, produisent à peine 15 g/m^2/an de m.s. (matière sèche). Ainsi, bien que les océans recouvrent les 7/10^e de la surface totale du globe, ils ne participent que pour 40 % à la production primaire nette totale. A l'opposé, les forêts qui ne correspondent qu'au dixième de la superficie terrestre fixent près de la moitié de l'énergie totale convertie par l'ensemble des

BRAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

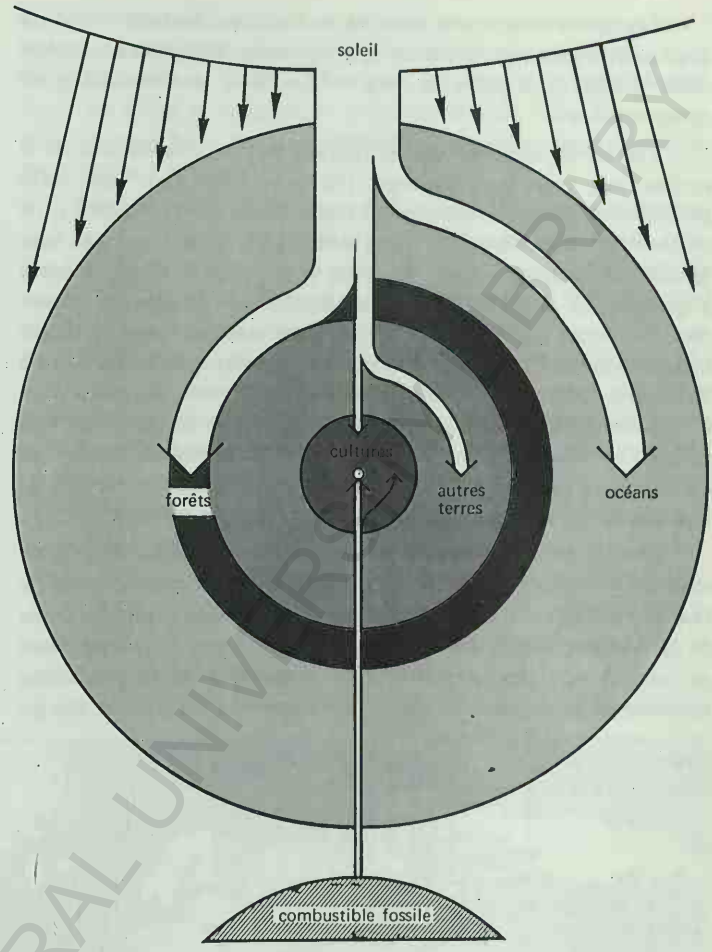


Figure 1.35
Production primaire des grandes subdivisions de la biosphère. L'intensité de la production est symbolisée par la densité des grisés. Remarquer la prépondérance des écosystèmes forestiers et la faiblesse relative de la production en milieu océanique malgré l'immensité de l'hydrosphère. D'après Whittaker, Scientific American, sept. 1970, p. 30.

producteurs primaires du globe. Elles représentent donc le plus efficace des écosystèmes, eu égard à l'importance de leur productivité primaire nette (Fig. 1.35) et jouent de ce fait un rôle essentiel dans les cycles du carbone et de l'oxygène.

La place des terres cultivées est assez modeste tant en valeur absolue que relative : on l'estime à 5 % de la productivité nette globale.

La figure 1.36 et le tableau V représentent la distribution de la productivité primaire nette dans les grandes subdivisions de la biosphère.

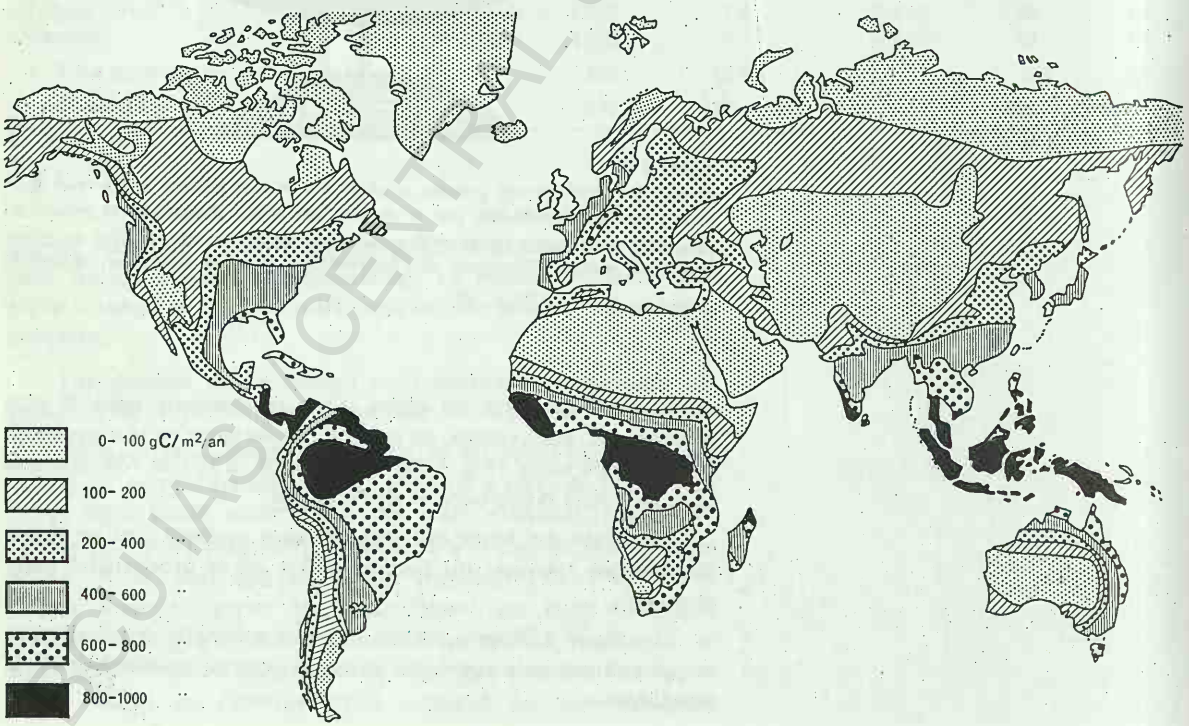
BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les forêts constituent donc, et de fort loin, les biomes dont la productivité primaire nette est la plus élevée, comprise en général entre 1 000 et 3 000 g de m.s./m^2/an (soit plus de 400 g de carbone/m^2/an).

Les terres cultivées, qui ne représentent qu'une fraction de la surface des continents émergés (10 % environ), ont une forte productivité primaire, évaluée en moyenne de 1 000 à 3 000 g de m.s./m^2/an. Cependant, certaines cultures pérennes tropicales hautement productives, comme la canne à sucre par exemple, arrivent à produire de 6 000 à 10 000 g de m.s./m^2/an. Il convient toutefois de noter que ces chiffres sont en quelque sorte artificiellement élevés. Il ne faut pas oublier que les hauts rendements obtenus par l'homme dans les cultures proviennent, pour une part, d'un apport énergétique complémentaire qui s'ajoute au flux solaire. Ils résultent de l'utilisation des combustibles fossiles en agriculture pour travailler le sol, faire les récoltes, synthétiser et transporter les engrais et les pesticides, irriguer les cultures, etc.

Les hautes productivités primaires nettes obtenues en agronomie ne traduisent donc pas un progrès dans l'utilisation de la photosynthèse mais tout simplement une augmentation artificielle de la quantité totale d'énergie entrant dans l'agroécosystème. Nous cernons là une des caractéristiques essentielles de la civilisation technologique contemporaine : l'accroissement du flux d'énergie

Figure 1.36
Productivité primaire des grands biomes. D'après Lieth in *Duvigneaud, op. cit*



SQUIAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

qui traverse la biosphère par emploi des hydrocarbures. Faut-il rappeler qu'en 1970, la quantité de combustibles fossiles qui ont été consommés à l'échelle planétaire est égale à la valeur énergétique de toute la production primaire nette de l'agriculture mondiale (énergie fixée par la photosynthèse en un an dans l'ensemble des cultures !).

Dans les autres terres émergées : steppes, paturages et dans les lacs profonds, la productivité primaire nette est plus faible, comprise entre 150 et 1 000 g de m.s./m^2/an. A l'opposé des forêts, se placent les déserts et les océans. Pour ces derniers, la productivité nette est comprise en moyenne entre 120 et 150 g de m.s./m^2/an. Si ces données ne surprennent pas, dans le cas des régions arides intertropicales, il n'en est pas de même pour le milieu marin que l'on a souvent tendance à présenter comme une source inépuisable de nourriture. Malgré les surfaces considérables qu'il recouvre, l'océan est une zone de très faible production primaire. Ryther (1963) l'estime tout au plus à 55 g de carbone/m^2/an pour la productivité primaire nette.

Si l'on examine maintenant plus en détail la répartition de la production primaire nette dans la biosphère, on constate que sa distribution diffère de façon radicale selon que l'on considère les continents ou les océans (Fig. 1.36 et 1.37).

Figure 1.37

Productivité primaire des océans. Remarquer la prépondérance des plateaux continentaux et des régions circumpolaires. D'après Lieth in *Duvigneaud, op. cit.*

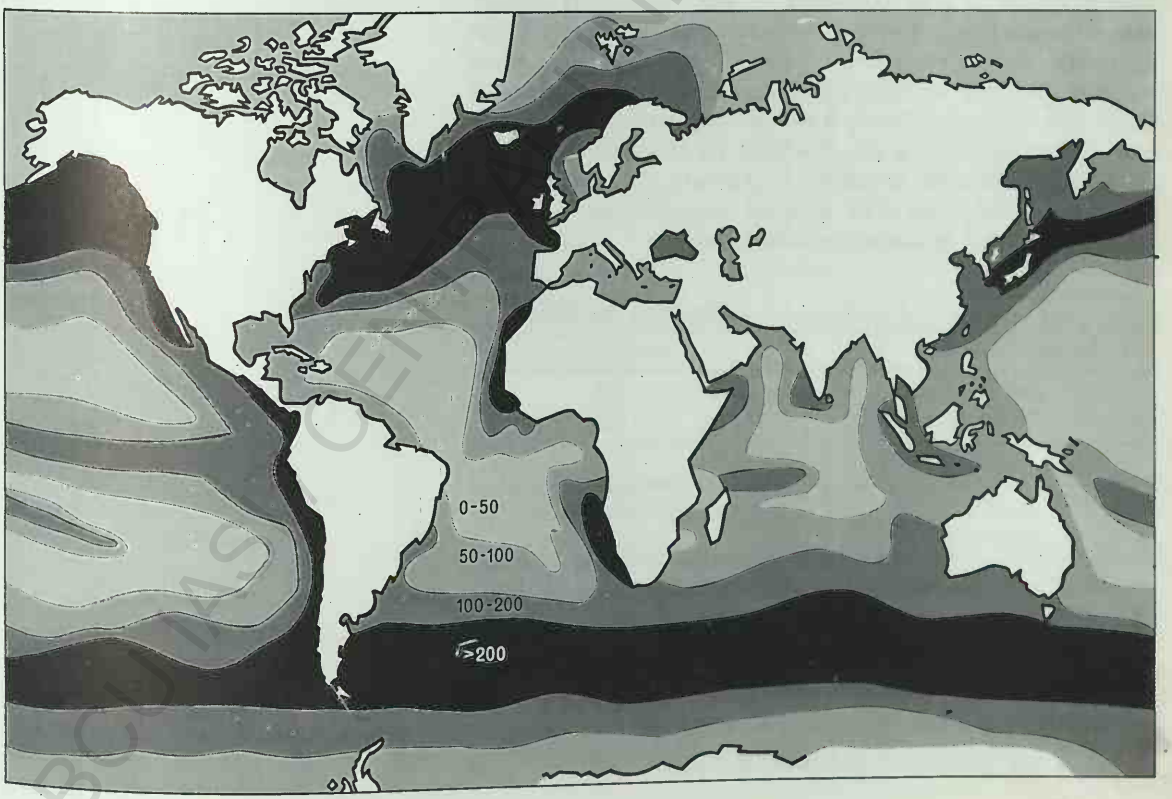


Tableau V — Productivité primaire annuelle des grands écosystèmes terrestres (*).

Macroécosystèmes	Surface en 10^6 km^2	Surface en % du total terres émergées	Fixation du carbone en t/ha/an	Productivité primaire nette en t, m.s/ha/an	Biomasse organique totale en 10^9T	kcal 10^{16}
Forêts	40,6	28	3	7	28,4	11,4
Agroécosystèmes	14,5	10	2,5	6	8,7	3,5
Steppes + pâturages	26,0	17	1,5	4	10,4	4,2
Déserts + toundra	54,2	36	0,1	1	5,4	2,2
Calottes glaciaires	12,7	9	0	0	0	0
	148,0	100			52,9	21,3

* d'après Duvigneaud 1967

Dans les écosystèmes terrestres, la productivité primaire nette exprimée en g de C/m^2/an est avant tout conditionnée par la température et l'hygrométrie. Supérieure à 800 g/m^2/an dans les forêts ombrophiles tropicales, elle est au contraire toujours plus faible que 100 g de C/m^2/an dans les toundras et les déserts avec des valeurs intermédiaires pour les autres biomes continentaux. Remarquons toutefois que, malgré la valeur considérable de la biomasse accumulée dans les forêts vierges des tropiques (jusqu'à 1 700 t/ha dans la sylve brésilienne !), leur productivité primaire nette n'est pas nettement supérieure à celle des forêts caducifoliées tempérées. Duvigneaud (1967) note à juste titre que celle-ci n'excède pas, dans les meilleurs des cas, deux fois à deux fois et demie celle des biomes forestiers de moyennes latitudes. Cet auteur écrit : *"la comparaison de valeurs précises de production en bois de peuplements d'essences tempérées et tropicales ne permet pas de maintenir ce sentiment d'un pays de cocagne pour les forêts ombrophiles. Voici les valeurs moyennes obtenues :*

	Bois forts en t/ha/an
Régions tempérées	
Feuillus divers	5,1
Résineux divers	5,3
Régions tropicales	
Feuillus divers	13,1
Résineux divers	12,6

On oublie néanmoins trop souvent que dans une grande partie des tropiques, la productivité annuelle s'abaisse considérablement à cause du développement d'une saison sèche plus ou moins longue".

La distribution de la production primaire nette en milieu océanique est totalement différente de celle observée dans les

BOLIVIAN CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

macroécosystèmes continentaux. Elle y est avant tout conditionnée par la teneur en sels nutritifs, en particulier en phosphates (Fig. 1.38). Les zones les plus productives se rencontrent dans les plateaux continentaux, les mers subarctiques et les formations coralliennes. A l'opposé, les étendues pélagiques tropicales présentent une productivité primaire quasi nulle, souvent de l'ordre de 30 g de C/m^2/an et constituent de véritables déserts océaniques (Fig. 1.37).

Le tableau VI montre les très grandes variations observées dans la productivité primaire nette selon les régions océaniques.

Quelques écosystèmes naturels peuvent, localement et dans des zones peu étendues particulièrement riches en éléments biogènes, atteindre des productivités primaires nettes égales ou supérieures à celle des cultures aux plus hauts rendements. C'est par exemple le cas de certains marécages eutrophes, de zones d'estuaires et des récifs coralliens. Dans ces derniers existent de superbes systèmes de production caractérisés par une symbiose entre des

Tableau VI – Productivité primaire nette en milieu marin (*)

Région	*Période*	*Productivité primaire nette* (*en* mg de C/m^2/jour)
Mer de Barentz	mai	1 300
Eaux atlantiques du Spitzberg	juin	2 400
Mer du Nord	moyenne annuelle	100 - 1 500
Côte danoise	décembre - août	10 - 700
Mer des Sargasses	été	100 - 200
Atlantique équatorial	avril-mai	230 - 300
" 15°45'S	avril	20 - 130
Pacifique côte équateur	automne	500 - 1 000
" 11°N, 115°W	automne	10
Mer d'Okhotsk	mai	2 000
Nord du Japon	maximum	5 100
Océan indien équatorial		200

* D'après Sisler (1970)

autotrophes (algues du groupe des zooxanthelles) et des animaux (polypiers) mais aussi par une remarquable adaptation de toute la biocœnose récifale, qui permet une circulation efficace des éléments biogènes (auto-fertilisation) dans l'ensemble de l'écosystème. Les formations coralliennes présentent une productivité primaire nette supérieure à la moyenne de l'ensemble des cultures faites par l'homme. Kohn et Hellfrich (1957) l'évaluent à 18,2 g de m.s./m^2/j pour trois atolls du Pacifique, valeur à rapprocher des 10 g/m^2/j obtenus dans les cultures de maïs à haut rendement et des 18,3 g de m.s./m^2/j de la canne à sucre aux îles Hawaï.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

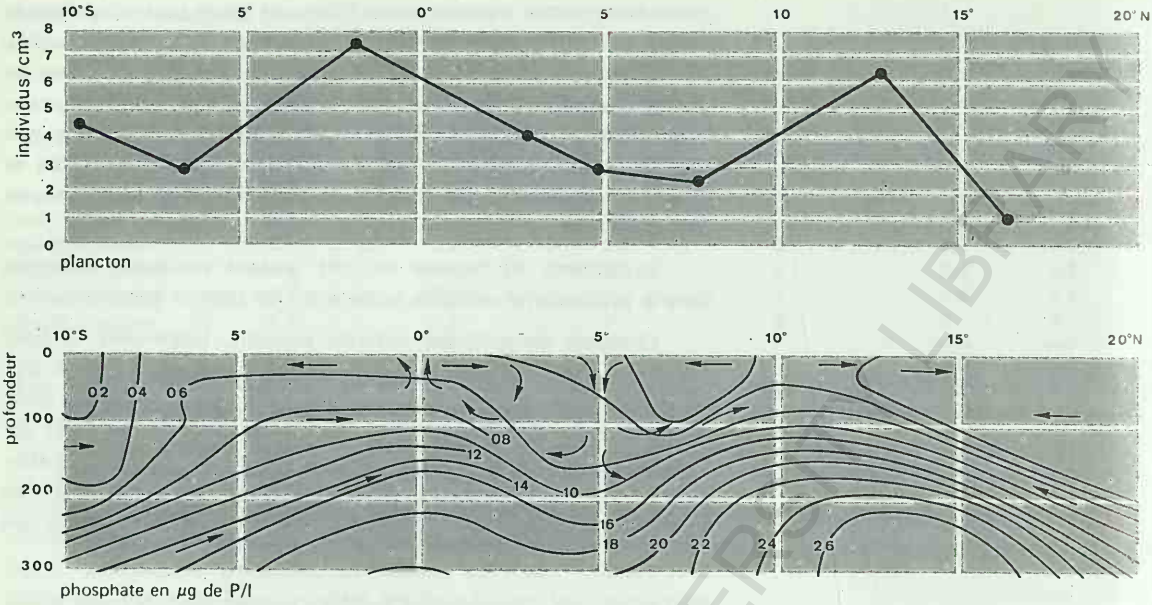


Figure 1.38
Corrélation entre la densité du plancton et la concentration en phosphates dans le Pacifique équatorial. D'après Sverdrup et coll. in *Odum*

De nombreux facteurs écologiques limitent la productivité primaire : il suffit qu'un seul d'entre eux soit présent à un taux relativement faible par rapport aux autres pour déterminer une nette diminution de celle-ci. L'ensoleillement, le taux de gaz carbonique, la température, l'humidité, l'azote, le phosphore et d'autres éléments biogènes représentent les principaux facteurs limitants.

Même dans la forêt ombrophile tropicale, la productivité est limitée, malgré l'énormité de la biomasse végétale, par les températures trop élevées et surtout par la quantité restreinte d'éléments minéraux indispensables présents dans le sol.

Dans les déserts, les steppes et même les biomes méditerranéens, c'est le manque d'eau qui limite la productivité primaire.

Les faibles températures jouent le même rôle dans les toundras subarctiques et aussi dans l'étage alpin.

Enfin, en milieu aquatique, nous avons déjà cité le rôle des nitrates et des phosphates dans la productivité des eaux continentales et océaniques.

La teneur en anhydride carbonique de l'atmosphère et de l'hydrosphère joue aussi un rôle déterminant dans le rendement de la conversion photosynthétique. Ce taux est resté constant pendant

des millions d'années, et de l'ordre de 300 ppm. Cependant, celui-ci s'accroît, lentement mais de façon régulière, depuis le début de la civilisation industrielle, dont l'expansion s'accompagne d'une consommation sans cesse croissante de combustibles fossiles. Il est des plus vraisemblable qu'en brûlant du charbon et du pétrole, l'homme accroisse involontairement la productivité primaire nette de la biosphère par cet accroissement du taux de gaz carbonique dans l'eau et l'atmosphère (cf. chap. III).

Le rendement de la conversion de l'énergie solaire en biomasse végétale varie beaucoup d'un écosystème à l'autre. Il peut atteindre 3 % pour certaines forêts mais est en général compris entre 0,5 et 1 % pour l'ensemble de ces biomes. Il est de l'ordre de 0,1 % dans les zones steppiques tempérées ou tropicales et inférieur à 0,05 % dans les déserts et les toundras.

En moyenne, ce même rendement est estimé à 0,1 % pour l'ensemble de la productivité primaire continentale et à 0,04 % pour celle des océans !

BIBLIOTECA CENTRALĂ
FACULTATEA DE GEOGRAFIE

PRODUCTIVITE SECONDAIRE

Pris au sens large, le terme de productivité secondaire désigne le taux d'accumulation de matière vivante (donc d'énergie) au niveau des hétérotrophes : consommateurs et décomposeurs.

Il n'existe qu'un seul type de productivité secondaire. En effet, quel que soit le niveau trophique auquel on se place, celle-ci consiste toujours en la conversion de la productivité primaire nette en différents tissus des multiples organismes hétérotrophes, grâce à un processsus unique et général puisque les animaux et les micro-organismes décomposeurs ne font que transformer des matières organiques déjà produites. Ce processus s'effectue avec un rendement assez faible, une bonne partie de l'énergie absorbée étant dissipée au cours des diverses phases de la respiration cellulaire et autres phénomènes métaboliques.

Il s'ensuit que, le flux total d'énergie entrant au niveau des hétérotrophes, l'ensemble de la production primaire nette est virtuellement consommée chaque année par la respiration des hétérotrophes situés en aval de la chaîne alimentaire. Cependant une faible fraction d'entre elle peut être accumulée dans la biomasse de ces derniers (productivité secondaire), dans les sols et les sédiments sous forme de matière organique morte, parfois même se fossiliser (hydrocarbures, sédiments marins profonds).

L'efficience des transferts d'énergie varie beaucoup d'une chaîne alimentaire à l'autre : il faut 80 kg d'herbe verte pour

obtenir 1 kg de bœuf mais seulement 5 kg de viande pour produire 1 kg de truite dans une pisciculture.

Si l'on examine maintenant des écosystèmes naturels, on relève aussi d'importantes fluctuations. En outre, la productivité secondaire y est souvent inférieure à celle obtenue dans les agroécosystèmes, mais cela traduit une distorsion artificiellement introduite par la technologie. En effet, dans la pratique de l'élevage, l'homme élimine tout ce qui pourrait concurrencer l'espèce domestique (un herbivore) tandis que dans un écosystème naturel, la productivité secondaire se répartit entre de nombreuses espèces de consommateurs. Il se produit en quelque sorte une canalisation de la production secondaire dans les agroécosystèmes, qui peut modifier subjectivement sa valeur si l'on se place d'un point de vue trop anthropocentrique. Ainsi Bourlière et Verschuren (1960) ont pu montrer que la production secondaire en ongulés des savanes d'Afrique centrale est supérieure à celle des bovins que l'homme tend à substituer à ces derniers sous les mêmes latitudes, si l'on prend en considération, non plus la productivité d'une espèce mais celle de l'ensemble de la zoocœnose mammalienne.

Tableau VII — Production et productivité secondaire de la biosphère (d'après Whittaker et Likens *in* Lieth et Whittaker, 1975)

Type d'Ecosystème	*Surface* 10^6 km^2	*Surface* 10^6 km^2	*Biomasse de Litière* 10^9 t	*Consommation animale* 10^6 t/an	*Production secondaire* 10^6 t/an	*Productivité secondaire en kg/ha/an de matière animale*	*Biomasse animale* 10^6 t
Forêts ombrophiles tropicales	17.0	136	3.4	2 600	260	152.9	330
Tropicale caducifoliée	7.5	38	3.8	720	72	96.0	90
Forêt tempérée de conifère	5.0	60	15.0	260	26	52	50
Forêt caducifoliée tempérée	7.0	35	14.0	420	42	60	110
Forêt boréale (Taïga)	12.0	144	48.0	380	38	31.7	57
Formations arbustives et buissonnantes	8.5	34	5.1	300	30	35.3	40
Savannes	15.0	60	3.0	2 000	300	200.0	220
Steppes tempérées	9.0	32	3.6	540	80	88.9	60
Toundra	8.0	16	8.0	33	3	3.8	3.5
Déserts et semi-déserts buissonnants	18.0	18	36	48	7	3.9	8
Déserts extrêmes, zones polaires	24.0	1.2	0.03	0.2	0.02	0.008	0.02
Agroécosystèmes	14.0	56	1.4	90	9	6.4	6
Marécages	2.0	14	5.0	320	32	160	20
Lacs et fleuves	2.0			100	10	50	10
Total des continents	149	644	111	7 810	909	61	1 005
Océan (au large)	332.0			16.600	2 500	75.3	800
Zones d'Upwelling	0.4			70	11	275.0	4
Plateau continental	26.6			3 000	430	161.7	160
Plateau continental	0.6			240	36	600.0	12
Estuaires	1.4			320	48	342.9	21
Total océanique	361			20.230	3 025	83.80	997
Total général	510			28.040	3 934		2 002

BOURSE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dans certaines biocœnoses naturelles, on a pu cependant montrer qu'il existe des populations d'herbivores sauvages dont le flux d'énergie est comparable à ce que l'on observe chez des ongulés domestiques.

Une étude faite sur un kobe *(Adenota Kob thomasini)* dans les steppes de l'Ouganda a révélé que la productivité secondaire de cette antilope était du même ordre de grandeur que celui des bovins élevés en paturage extensif : 74 kcal/m^2/an sont convertis en 0,81 kcal/m^2/an de biomasse. Cette espèce consomme 10 % de la productivité primaire, ce qui correspond à un flux d'énergie très élevé par rapport aux autres mammifères sauvages (selon Buchner *in* Dajoz, 1971).

Si l'on examine maintenant, non plus le rendement de la conversion d'énergie au niveau des consommateurs primaires (herbivores), mais celle des organismes situés au sommet de la chaîne trophique, on arrive à des taux dérisoires.

Dans l'exemple cité plus haut de l'enfant se nourrissant uniquement de veaux, eux-mêmes élevés aux dépens d'un seul champ de luzerne, le rapport entre la productivité primaire nette et la production secondaire (au niveau du carnivore, en l'occurence l'enfant) est de

$$\frac{8{,}3 \times 10^3 \text{ kcal}}{1{,}49 \times 10^7 \text{ kcal}} \quad \text{soit} \quad 5{,}5 \times 10^{-4}$$

Ce rapport serait encore plus faible si l'on tenait compte non plus de la biomasse du consommateur secondaire mais de son accroissement de poids (productivité secondaire nette) que l'auteur n'a pas précisé.

On a pu évaluer la productivité secondaire dans une zone de pêcherie située sur le littoral oriental des Etats-Unis : 3×10^6 kcal tombent chaque jour sur 1 m^2 de surface marine. Cette énergie est convertie en 9 000 calories de diatomées (phytoplancton) qui assurent la production de 4 000 calories/j de zooplancton . . . et de 5 cal/j de poissons carnivores. La faiblesse du rendement résulte des pertes subies à chaque niveau d'une chaîne alimentaire. Plus grande sera sa longueur, plus faible sera la productivité secondaire utilisable par l'homme. Ce qui est souvent le cas en milieu aquatique : la productivité des pêcheries mondiales n'est que de 0,05 g/m^2/an et encore s'agit-il de poids frais ! Cependant, la productivité secondaire nette peut être assez élevée dans certains écosystèmes aquatiques par suite de la haute efficience de certains vertébrés poïkilothermes dans la conversion d'énergie.

Le tableau VII a montre la grande variabilité que peut présenter la productivité secondaire dans divers écosystèmes aquatiques. On remarque aussi que les grandes surfaces d'eaux continentales ou océaniques présentent une moindre productivité que

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

des milieux d'étendue plus restreinte mais qui bénéficient d'une abondante fertilisation naturelle ou artificielle (pisciculture).

Lors du passage d'un niveau trophique à l'autre, la biomasse en présence peut varier dans le rapport de 100 à 1 000. Kovda (1968) cite les valeurs suivantes pour divers écosystèmes continentaux (Tableau VII b).

Tableau VII a — Productivité secondaire de quelques écosystèmes aquatiques (*)

Ecosystème aquatique (et niveau trophique)		*Poids frais de poisson* en g/m^2/an
I. *Eaux naturelles*		
Mer du Nord	Mélanges d'espèces herbivores et carnivores	1,68
Grands lacs américains		de 0,09 à 0,82
Lacs africains		de 0,16 à 25,2
Petits étangs Nord américains	espèces carnivores	de 4,5 à 16,8
Mares d'Europe centrale	espèce herbivore (carpe)	de 11,2 à 39
II. *Pisciculture (apport de fertilisants et de nourriture)*		
Chine (espèces herbivores)		112 à 1 540 !
Etats-Unis (salmonides, carnivores)		227

* Données compilées de divers auteurs *in* Odum (1959)

Tableau VII b

	Toundra	*Taïga*	*Forêt caducifoliée*	*Steppes*
Biomasse végétale	$n \times 10^3$	$n \times 10^5$	$n \times 10^5$	$n \times 10^2$
Herbivores	$n \times 10^{-1}$	$n \times 10$	$n \times 10^0$	$n \times 10^0$
Carnivores	$n \times 10^{-2}$	$n \times 10^{-2}$	$n \times 10^{-2}$	$n \times 10^{-2}$

Ce tableau révèle que la biomasse de vertébrés est fort réduite dans de nombreux écosystèmes continentaux, en particulier dans les forêts où, à l'exception des insectes phytophages, la majorité des organismes hétérotrophes s'insèrent dans des chaînes alimentaires de type détritiphago-saprophytiques.

Ainsi, Bourlière cite une biomasse de 1 kg/ha pour l'ensemble des mammifères (rongeurs et primates inclus) d'une forêt ombrophile ghanéenne. Duvigneaud a pu évaluer à 0,7 kg/ha de sanglier, 0,5 kg/ha de chevreuil et 5 kg/ha de petits rongeurs les biomasses mammaliennes d'une forêt ardennaise !

La biomasse animale paraît plus importante en milieux limnique et océanique. Elle est particulièrement abondante en ce qui concerne les divers invertébrés zooplanctoniques. Cela se traduit par l'existence de pyramides écologiques inversées (Fig. 1,30).

BOURNEMOUTH CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il faut cependant se garder de confondre productivité et biomasse (1). Si dans les biocœnoses marines ou lacustres on peut observer des productivités secondaires parfois élevées, on constate aussi dans ces milieux que la biomasse de producteurs-phytoplancton est faible. Cependant le turn-over rapide de cette dernière, c'est-à-dire la grande vitesse de croissance et de reproduction des différents organismes phytoplanctoniques, assure une production nette assez importante, suffisante pour nourrir une biomasse animale élevée.

A l'inverse, malgré une biomasse très importante, la productivité nette des forêts est faible ou nulle. La confusion fréquente entre ces deux concepts distincts a conduit bien souvent à des mécomptes dans l'exploitation des ressources naturelles, en particulier forestières.

Bien qu'une biocœnose riche et productive puisse renfermer un nombre et une masse d'organismes supérieurs à celui d'une communauté moins productive, cela ne constitue pas et de fort loin, une règle générale.

En effet, la notion de productivité fait intervenir le facteur temps. La biomasse sur pied peut être très importante dans un écosystème, sans que la productivité soit pour autant supérieure à celle d'une communauté constituée par des organismes de moindre taille mais dont les taux de croissance et de reproduction sont plus élevés.

Une forêt de chênes pluricentenaires renferme une biomasse trente fois supérieure à celle d'un champ de maïs. Mais dans la forêt, la productivité est faible ou nulle car toute la production primaire nette est consommée par des hétérotrophes, surtout des décomposeurs dont les populations ont elles-mêmes atteint leur densité maximale et ne s'accroissent plus. Il n'y a plus d'accroissement de la biomasse. La respiration de la communauté consomme la totalité de la matière organique produite.

Au contraire dans une culture, la productivité est élevée et une grande partie de la production primaire nette est disponible pour l'homme.

Il est probable que la tendance de notre espèce à simplifier les écosystèmes naturels découle d'une propension plus ou moins consciente à modifier les biocœnoses dans un sens qui favorise l'augmentation de productivité.

L'étude du paramètre Q = Productivité primaire nette/biomasse totale montre que celui-ci décroît pour les écosystèmes terrestres de complexité biocœnotique croissante, c'est-à-dire au fur et à mesure que l'on considère des communautés dont la diversité spécifique et la densité des réseaux trophiques s'élèvent.

(1) La lecture du tableau VII montre par exemple que la biomasse animale totale des écosystèmes continentaux est supérieure à celle que renferme l'océan mondial alors que la superficie de ce dernier dépasse le double de celle des terres émergées. A l'opposé, la productivité secondaire moyenne des biomes continentaux est de 61 kg/ha/an alors que celle de l'océan excède 75 kg/ha/an. Il n'existe donc pas de relation de proportionalité entre biomasse animale sur pied et productivité secondaire.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY BRARY

Le coefficient Q présente une valeur maximale pour la toundra et les autres écosystèmes subarctiques (peu d'espèces, grande simplicité des chaînes alimentaires). Au contraire, celle-ci n'est minimale que pour la forêt ombrophile tropicale dont la biocœnose est d'une extrême complexité (multitude d'espèces et de réseaux trophiques).

De même en milieu marin, le coefficient Q est compris entre 5 et 10 dans le cas du phytoplancton pélagique, mais seulement entre 2 et 3 dans les récifs coralliens qui représentent les plus complexes et les plus diversifiés des écosystèmes océaniques.

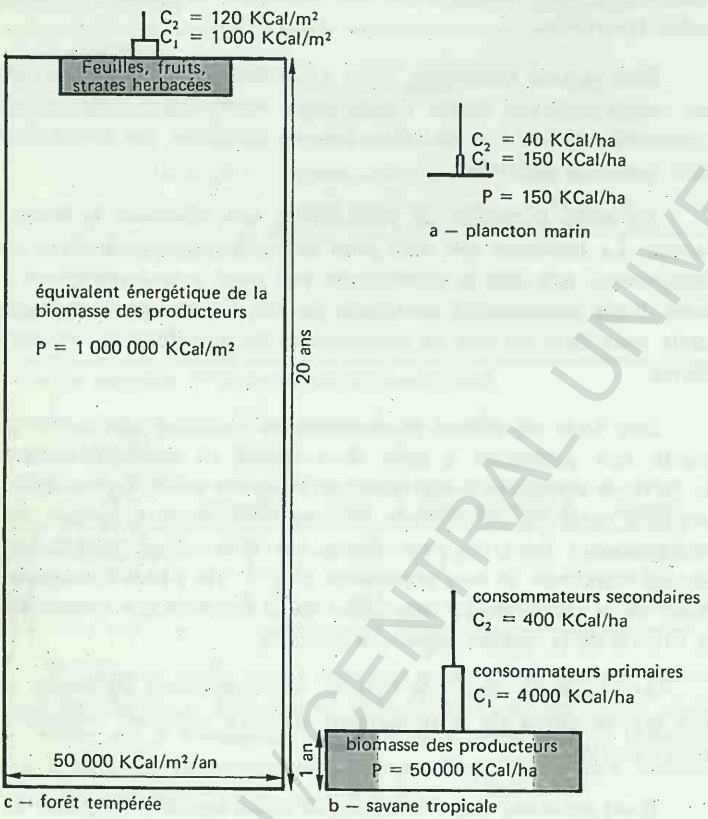


Figure 1.39
Représentation synthétique des aspects statiques et dynamiques de la structure trophique de trois écosystèmes. a) milieu marin pélagique b) savane tropicale c) forêt caducifoliée tempérée. D'après Lamotte, C.R.Ac.Sc. *Paris, 268, 1969, série D, p. 2953*

Pour tenir compte des grandes différences entre les valeurs relatives à la biomasse et les productivités, Lamotte (1969) a proposé de modifier la représentation des pyramides écologiques. Cet auteur a suggéré de figurer le flux d'énergie à chaque niveau trophique sous forme d'un rectangle de hauteur proportionnelle à la durée pendant laquelle s'est faite l'accumulation de la biomasse.

BOUAKE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il obtient dans ces conditions une représentation synthétique des aspects statiques et dynamiques de la structure trophique des écosystèmes (Fig. 1.39).

Avant de clore ce chapitre, il est aussi indispensable de préciser qu'en un milieu déterminé, la productivité et la biomasse vont varier en fonction du temps s'il se produit une succession de communautés. Prenons l'exemple d'un champ abandonné, nous observerons la succession suivante : l'agroécosystème *(ager)* sera remplacé, après deux ou trois ans, par une prairie subspontanée (pâturage ou *saltus*) qui sera peu à peu envahie par des végétaux ligneux et des plantes arbustives(1). Enfin après un laps de temps variable (20 à 100 ans), une forêt *(sylva)* occupera l'emplacement abandonné par l'homme. La forêt, qui représente sous nos latitudes la formation végétale climacique, mettra plus d'un siècle pour atteindre son plein développement (écosystème à maturité) (Fig. 1.40). Au cours de la succession (1)

$$Ager \longrightarrow Saltus \longrightarrow Sylva,$$

(1) Stade encore dénommé Fruticée.

(1) Une telle succession est dénommée *série progressive* car les biocoenoses qui se succèdent sont de plus en plus riches et diversifiées.

En région tempérée, l'étude de la succession dans une série progressive conduisant à un climax tempéré montre que les biocœnoses passent par une série de stades intermédiaires bien déterminés qui se succèdent dans un ordre immuable.

Woodwell et Coll. (Fig. 1.40 et 1.40a) ont étudié les variations

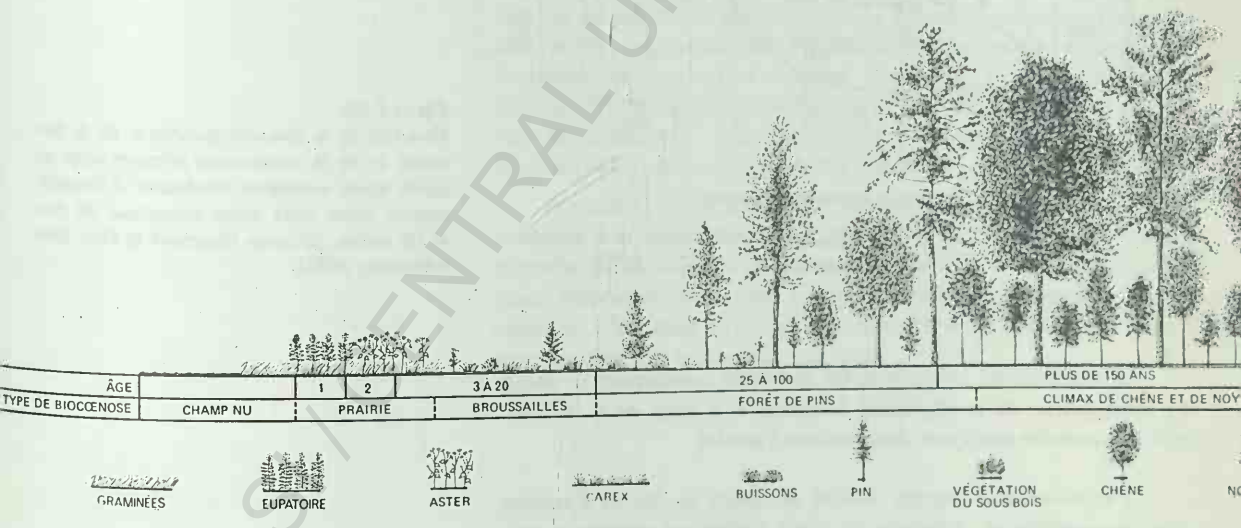


Figure 1.40
Exemple de succession : la recolonisation d'un champ abandonné par la végétation naturelle conduit à une succession de biocœnoses de plus en plus diversifiées et de biomasses de plus en plus élevées (série progressive) jusqu'au stade climacique. Ici est figuré le cas d'un écosystème climax d'Amérique septentrionale (forêt caducifoliée de chênes et de noyers blancs du genre Carya*). D'après Woodwell, Scientific American, sept. 1971*

EU IAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

de diversité spécifique, de productivité et de biomasse qui conduisent à la constitution de forêts mixtes de pins et de feuillus ou de forêts caducifoliées climaciques dans le Nord-Est des Etats-Unis. Un champ abandonné se transforme d'abord en une prairie de plantes herbacées annuelles puis vivaces. Après 4 à 8 ans lui succède une formation comprenant des végétaux ligneux (chamæphytes). Après une dizaine d'années de jeunes arbres commencent à s'installer (stade de la fructicée) ; un demi-siècle est généralement nécessaire pour que le stade forestier soit atteint.

On constate d'importantes variations de la diversité spécifique au cours de la succession (Fig. 1.40a). Celle-ci atteint son maximum à la fin du stade prairial pour décroître ensuite car les espèces non forestières disparaissent lorsque le boisement s'est installé. En revanche, la biomasse végétale sur pied, de même que celle des décomposeurs et de la faune endogée s'accroissent avec le temps et plafonnent lorsque le climat forestier est atteint.

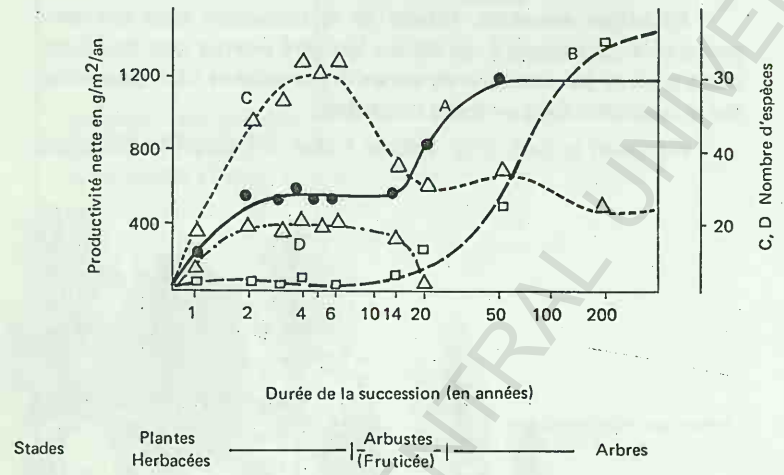


Figure 1.40a
Variation de la diversité spécifique, de la biomasse et de la productivité primaire nette au cours d'une succession conduisant à l'établissement d'une forêt mixte climacique de pins et de chênes. (D'après Woodwell et Coll. dans Whittaker, 1975).

La productivité primaire nette augmente rapidement au début de l'installation de la végétation herbacée et à celui de la fruticée, puis elle culmine après une cinquantaine d'années.

L'accroissement ligneux annuel se réduit au fur et à mesure que l'écosystème se rapproche du stade climacique puisque le peuplement arboré tend vers sa maturité. Dans ces conditions, la production en bois de l'écosystème forestier ne correspond plus qu'au remplacement des arbres âgés morts sur pied lorsque le climax est atteint.

Les forestiers (Fig. 1.40b) tiennent compte de ces variations de productivité en fonction du temps pour fixer le moment de la

ECOLE CENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

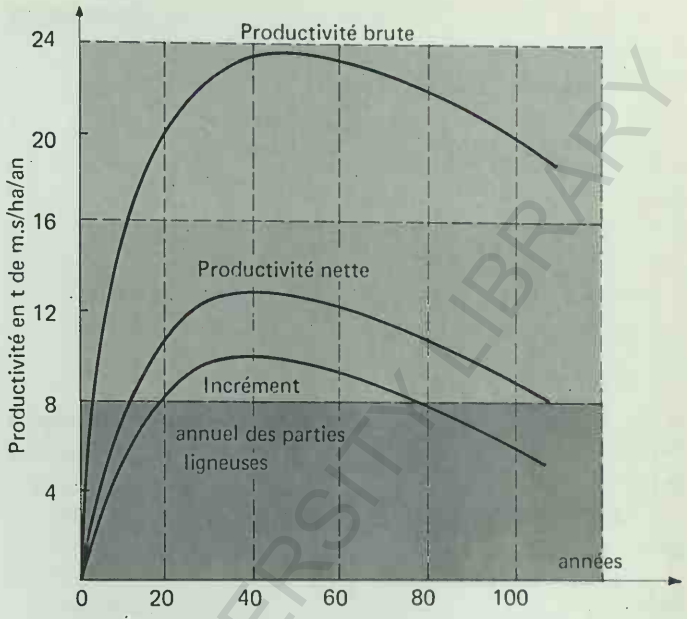


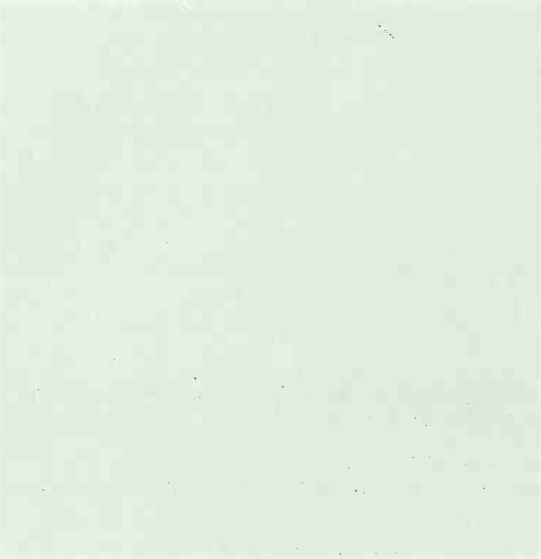
Figure 1.40b
Variation de productivité primaire dans une hêtraie danoise d'âge croissant. La courbe supérieure correspond à la productivité brute, l'intermédiaire à la productivité nette totale (litière + parties ligneuses), l'inférieure à l'accroissement des parties ligneuses. (D'après Möller et Coll. in Duvigneaud, 1974).

coupe. Celui-ci correspond au stade où culmine la production en matières sèches.

En définitive, quand le climax est atteint, la productivité globale de l'écosystème est nulle car la biomasse totale ne s'accroît plus et la respiration des Hétérotrophe consomme entièrement l'excédent de production primaire disponible. En conséquence, à l'opposé d'une opinion communément admise, les forêts à maturité ne produisent aucun excédent d'oxygène car le rapport O_2 produit/O_2 consommé est égal à l'unité.

Au cours de la succession, le coefficient Q aura une nette tendance à la décroissance en fonction du temps. Le rapport productivité brute/respiration, qui est supérieur à 1 dans les biocœnoses pionnières, tend vers 1 quand l'écosystème approche de sa maturité. C'est dans le climat que flux d'énergie et biomasse atteignent en revanche leur valeur maximale.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE II

Chapitre II — Les facteurs de dégradation de la biosphère : leur nature, leur importance 111

Impact de la technologie 112

Altérations de l'environnement engendrées par les hommes primitifs 112

L'agriculture, première cause de déséquilibre due à l'action de l'homme 113

La société technologique contemporaine et son impact sur la biosphère 117

L'explosion démographique humaine 122

Histoire démographique de l'humanité 122

Etude démoécologique des problèmes de surpeuplement 134

Rappel des notions élémentaires de dynamique des populations 134

Causes démoécologiques de la surpopulation humaine 143

Prospectives démographiques : catastrophe ou stabilisation ? 147

La transition vers la croissance démographique zéro 150

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

II
LES FACTEURS DE DEGRADATION DE LA BIOSPHERE : LEUR NATURE, LEUR IMPORTANCE

L'homéostasie de la biosphère n'a jamais été menacée par aucune des innombrables espèces vivantes qui l'ont peuplée jusqu'à l'époque très récente, eu égard à la durée des temps géologiques, où se différencia, avec le genre humain, le pire des ravageurs que l'univers ait connu. Celui-ci n'apparut qu'à la fin de l'ère tertiaire. Les plus anciens fossiles d'hominiens, ceux de l'*Homo habilis* du ravin d'Olduwaï, en Tanzanie, sont vieux de quelque 1 700 000 ans. Cependant plus d'un million d'années s'écoulèrent avant que nos lointains ancêtres *Paléanthropiens* n'aient assez évolué et atteint une densité de population suffisante pour prendre une importance significative par rapport aux autres mammifères et avant qu'ils n'exercent une influence perturbatrice réelle sur les biocœnoses.

Avec *l'Homo sapiens* apparut, il y a quelques centaines de milliers d'années, la première espèce animale dont l'impact sur la biosphère constituait une source potentielle de déséquilibre suffisante pour compromettre sa pérennité. Depuis lors, *le progrès incessant de la technologie,* associé à un vertigineux *accroissement démographique,* exercèrent sur le milieu naturel une action destructrice sans égale dans l'histoire de la terre. L'homme apparaît donc comme le seul, l'unique responsable de la dégradation de la biosphère laquelle, de l'avis des écologistes et des paléontologistes, n'a pas encore atteint l'apogée de son évolution.

Au fur et à mesure du développement de la pensée réfléchie et des autres progrès biologiques associés à l'hominisation, notre espèce a mis au point de nouvelles méthodes d'exploitation de la nature, de nouveaux outils, des technologies sans cesse plus perfectionnées qui lui ont permis d'altérer, à un degré inégalé, la surface du globe et cela de façon délibérée, à l'opposé des espèces

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

animales qui auraient pu l'avoir précédé dans cette voie. Les progrès de l'intelligence chez les hommes primitifs, les archanthropiens, puis chez *l'Homo sapiens*, se sont accompagnés, non sans quelque paradoxe, d'une acquisition de comportements psychologiques néfastes, inconnus ou rarissimes chez les autres animaux. Ceux-ci l'ont conduit par cupidité, imprévoyance, sinon par vandalisme, à entreprendre la ruine de son propre environnement. Loin d'avoir disparu dans la civilisation contemporaine, le désir de profits immédiats ou à court terme, s'est traduit au cours des temps par une exploitation irréfléchie, exagérée, des ressources naturelles. Il conduit peu à peu, de nos jours, vers une inexorable destruction de la biosphère, s'il n'est pas mis un terme, dans un proche avenir à de telles pratiques.

IMPACT DE LA TECHNOLOGIE

Altérations de l'environnement engendrées par les hommes primitifs

Le *feu* constitua certainement le premier acquis technologique de l'humanité. Jusqu'à ce qu'il s'en assure la maîtrise, l'homme vécut en parfaite harmonie avec la nature, tout au moins sur le plan écologique. Nos lointains ancêtres du Paléolithique inférieur, fort peu nombreux, n'exerçaient sur le milieu naturel qu'une action limitée. En ce sens, ils faisaient partie intégrante des écosystèmes, et ne représentaient qu'un des multiples éléments qui constituent les biocœnoses, incorporés comme toutes les autres espèces aux cycles de la matière et au flux de l'énergie dans la biosphère. Mais, aussitôt que les chasseurs paléolithiques disposèrent du feu, ils se mirent à exercer sur le milieu naturel une action dégradante, hors de proportion avec leurs faibles effectifs. Nous avons aujourd'hui la certitude que l'usage du feu pour faire fuir et traquer le gibier provoqua, il y a déjà plusieurs centaines de milliers d'années, un bouleversement dans les communautés végétales, en diverses régions du globe. Si l'Afrique fut sans doute la plus affectée, nous possédons aussi les preuves que d'immenses incendies ravagèrent le couvert végétal d'Europe Centrale au Paléolithique.

Dans les régions tropicales et peut-être tempérées, ces incendies causèrent la destruction de vastes surfaces de forêts primitives et interdirent leur régénération ultérieure. De plus, le couvert végétal spontané fut aussi dégradé un peu plus tard par l'homme de façon intentionnelle, en diverses régions d'Afrique, d'Asie et d'Amérique tropicale. Ces pratiques avaient pour but de favoriser la constitution de steppes à graminées, qui supportent une faune d'ongulés plus dense que celle des forêts primitives. Ainsi, ces incendies volontaires du couvert forestier ont déterminé l'extension des savanes en Afrique occidentale et en Asie du Sud-Est. Il y a

PONTIFICIA UNIVERSITY LIBRARY

une dizaine de millénaires, les Indiens d'Amérique du Nord ont étendu de la même façon la "prairie", en brûlant les forêts afin d'aménager des terrains de parcours pour les bisons. Si dans ce dernier cas et dans quelques autres, cette modification du couvert végétal ne s'accompagne pas d'une perte de productivité pour les biotopes ainsi transformés, la dégradation systématique des communautés végétales par le feu a souvent amoindri la capacité biologique des milieux, comme en atteste l'étude des savanes de Côte d'Ivoire (Lamotte et coll., 1967 et suivantes), du Brésil et de la Guyane.

Mais les chasseurs paléolithiques n'ont pas seulement modifié ou dégradé les communautés végétales sur de vastes surfaces. Toujours à l'aide du feu, combiné à l'emploi de diverses techniques de chasse, ils ont aussi appauvri de façon sensible la composition spécifique de la grande faune de Vertébrés qui peuplait diverses régions du globe.

Nous possédons aujourd'hui les preuves paléontologiques de cette extermination de plusieurs espèces animales géantes, témoins attardés de la riche faune du Néogène. Ainsi a-t-on pu parler des massacres du Pleistocène (Martin, 1967) qui, en Afrique tropicale, firent disparaître de la sorte, il y a environ 50 000 ans, plus de la moitié des grands mammifères survivants des lointaines époques tertiaires. De même, les chasseurs du Paléolithique supérieur exterminèrent au Mahgreb, il y a environ 12 000 ans, au moins 60 % de la grande faune mammalienne qui peuplait cette région.

Les Paléo-indiens d'Amérique du Nord ont éliminé le mammouth et le bison antique (*Bison antiquus*), dont ils anéantissaient des troupeaux entiers, vers la même époque. On a ainsi découvert des charniers de ces animaux qui, cernés par les chasseurs et effrayés par le feu, allaient se précipiter dans des ravins ou des tranchées creusées à cette fin.

La disparition des Xénarthres géants d'Amérique du Sud, comme les Glyptodontes, pourrait aussi avoir été accélérée par les Amérídiens primitifs. Enfin, les paléontologistes sont aussi convaincus du rôle qu'a joué l'homme dans l'extinction des Dinornithides, ces Ratites géants de Madagascar et de Nouvelle Zélande.

L'agriculture, première cause de déséquilibre due à l'action de l'homme.

Au début du Néolithique, l'impact de l'homme sur la biosphère s'accrut de plusieurs magnitudes avec la découverte de l'agriculture et l'accroissement démographique sans précédent qui en résulta. Cette dernière constitue, sans conteste, la seconde révolution technologique de l'humanité et a conditionné toutes les structures sociales adoptées par les civilisations qui se succédèrent depuis cette époque jusqu'à une date récente et persistent encore en bien des pays du tiers-monde.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le développement de l'agriculture constitue aussi la première grande perturbation de la biosphère causé par l'homme. Il accéléra les modifications des zoocœnoses évoquées ci-dessus en accroissant la vitesse d'élimination de la grande faune que les pasteurs considèrent souvent comme concurrente des animaux domestiques. Mais surtout, l'extension de l'agriculture se caractérisa par des substitutions d'écosystèmes. La série régressive : *Sylva* ⟶ *Saltus* ⟶ *Ager* évoquée par Kuhnholtz-Lordat se traduisit par une substitution d'écosystèmes ; les biomes forestiers climaciques furent remplacés par des pâturages puis par des cultures.

L'agriculture se caractérise en effet par l'élimination définitive du couvert végétal primitif sur de vastes étendues, lequel est détruit pour céder la place à un petit nombre d'espèces végétales cultivées, que l'homme a choisi parmi celles qui conviennent le mieux à son alimentation.

L'extension de l'agriculture a exercé une influence catastrophique sur bien des écosystèmes terrestres. La déforestation massive, effectuée sans discernement, la mise en culture intempestive des sols fragiles des régions tempérées ou tropicales ruinèrent irrévocablement d'immenses territoires.

L'horror sylvanum du Moyen-Age exprime bien cette attitude destructrice de l'homme à l'égard de l'arbre. Elle s'est manifestée sous toutes les latitudes et dans des civilisations aussi éloignées de la nôtre que celle de la Chine antique. Faut-il rappeler que seulement 5 % de la surface de ce pays est aujourd'hui boisée, alors que les forêts couvraient au moins 90 % de sa surface au début du Néolithique ?

Outre la création d'agroécosystèmes, dans lesquels la diversité spécifique est des plus réduites puisque l'homme y élimine, de façon artificielle, toute concurrence interspécifique pour favoriser un petit nombre de plantes cultivées, l'agriculture s'est accompagnée de la domestication d'un petit nombre d'espèces animales dont certaines furent utilisées pour le trait.

Elle eut aussi pour conséquence essentielle d'accroître considérablement la masse de nourriture produite par unité de surface, et la quantité d'énergie mécanique dont l'homme pouvait disposer. La figure 2.1 illustre bien la modification des rapports entre l'homme et le milieu naturel qui accompagne le développement de l'agriculture.

L'agriculture permit aussi une certaine sédentarisation de l'habitat et l'apparition des concentrations humaines avec la création des premières cités.

Alors que le chasseur paléolithique avait besoin d'une vingtaine de km^2 pour survivre, ce qui impliquait une forte dissémination du peuplement, l'agriculteur néolithique se satisfaisait de quelques hectares. Par ailleurs, la découverte de la conservation des céréales dans des silos étanches permit la constitution de réserves et favorisa la transition du nomadisme au sédentarisme.

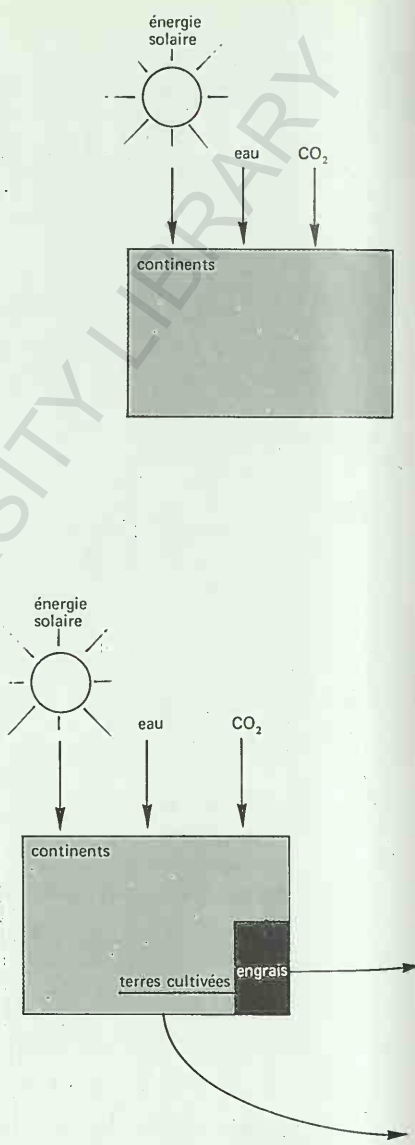
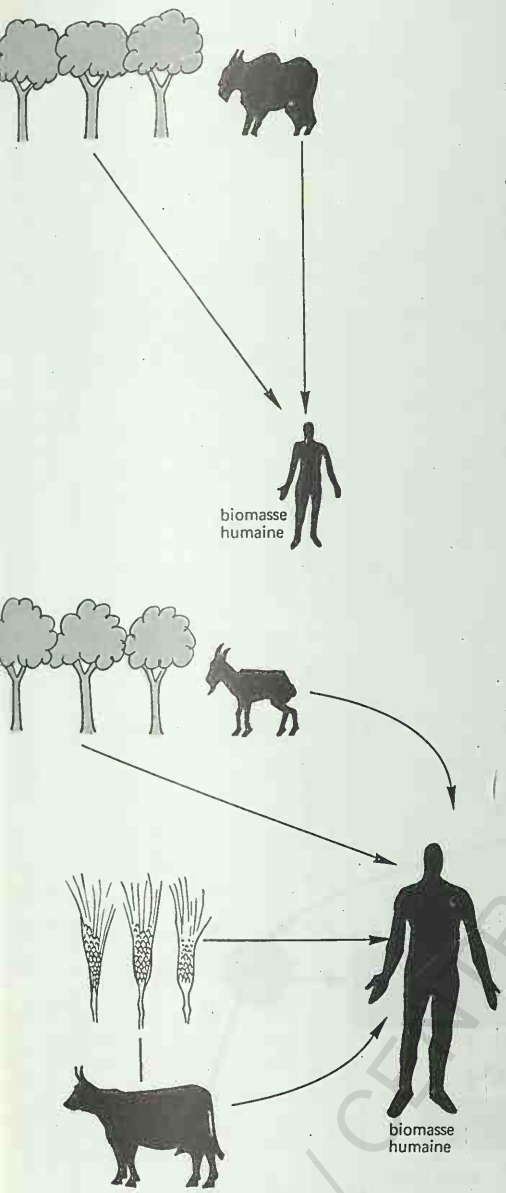


Figure 2.1
Modification des rapports entre l'homme et la biosphère à la suite de l'invention de l'Agriculture au Néolithique. En A, les chasseurs prédateurs Paléolithiques utilisaient toute la surface disponible pour la cueillette et la capture du gibier, et ne pouvaient survivre qu'à de faibles densités de population. En B, la biomasse humaine a présenté un considérable accroissement grâce à la découverte de l'Agriculture. Celle-ci a concentré l'activité de pro-

COPYRIGHT CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



duction alimentaire sur une fraction de la surface des continents émergés où la fertilisation d'abord avec les fumures organiques (déchets végétaux, fumier etc.) puis avec les engrais minéraux a permis une augmentation très importante de la quantité de nourriture disponible. Notons qu'en B, l'homme fait aussi appel à d'autres sources d'aliments que l'agriculture, en particulier grâce à la pêche. D'après Brown in *Scientific American, "the biosphere", sept. 1970, p. 162*

Malheureusement, la mise en culture intempestive de terres marginales, l'irrigation systématique de sols dont la structure pédologique ne pouvait pas supporter cette pratique, enfin le surpâturage eurent des conséquences catastrophiques sur la productivité des milieux ainsi modifiés.

La destruction des communautés végétales naturelles fut souvent un prélude à l'aridification ou à la désertification totale de bien des territoires livrés à la culture ou transformés en pâturages. L'usage accru du feu par les pasteurs protohistoriques, afin d'aménager des terrains de parcours pour les animaux domestiques, en particulier la pratique du brûlis dans les régions méditerranéennes — incendie volontaire des forêts ou des maquis afin d'obtenir une repousse d'herbe verte— détruisit de nombreux boisements primitifs dont la disparition remonte à plusieurs millénaires en divers points du bassin méditerranéen.

L'irréversible altération du milieu naturel était déjà accomplie dans bien des régions dès le début de l'ère chrétienne. Tel est entre autres le cas du croissant fertile. Ce territoire, berceau de la civilisation, s'étend en arc de cercle du sud de la Palestine, au nord de la Syrie et en Mésopotamie, où il se prolonge même jusque dans la partie orientale de l'Iran. C'est là que fut inventée l'agriculture, il y a plus de 10 000 ans : on a pu mettre en évidence le stockage du grain et l'élevage du mouton dès le IX^{e} millénaire dans les vestiges de Zawi Chemi en Irak. Aujourd'hui, le désert de sable s'étend sur bien des sites préhistoriques du Moyen-Orient où prospéraient, il y a 8 000 ans, de florissantes civilisations agricoles néolithiques. L'exploitation abusive de ces biotopes détruisit peu à peu les forêts, le couvert végétal secondaire, puis les sols . . .

Jusqu'à une date récente et malgré les progrès de la culture et de la technologie, les diverses sociétés qui se succédèrent au cours des temps conservèrent un fondement commun remontant au Néolithique. Quelles que soient leurs bases socio-économiques, elles présentaient toutes une structure essentiellement agricole.

Malgré le développement croissant des villes et l'apparition de secteurs d'activité industrielle, la majorité de la population vivait de l'agriculture. En ce sens, l'impact de l'homme sur la nature est resté fondamentalement identique, dans son essence, jusqu'au milieu du siècle dernier, où la mise en pratique de diverses découvertes scientifiques par le grand capitalisme naissant caractérisa l'avènement de la civilisation technologique contemporaine.

En définitive, la civilisation agraire n'a pas modifié de façon irréversible le cycle de la matière et le flux d'énergie dans la biosphère, on peut même dire que l'écosystème humain, dans cette forme de Société, s'intègre à l'ensemble des phénomènes écologiques naturels.

Quel que soit le degré d'évolution d'un groupe humain, on peut schématiser son organisation, son fonctionnement, ses rapports avec le biotope et le reste de la biocœnose qui l'entourent

LUCIEN CENTRAL LIBRARY

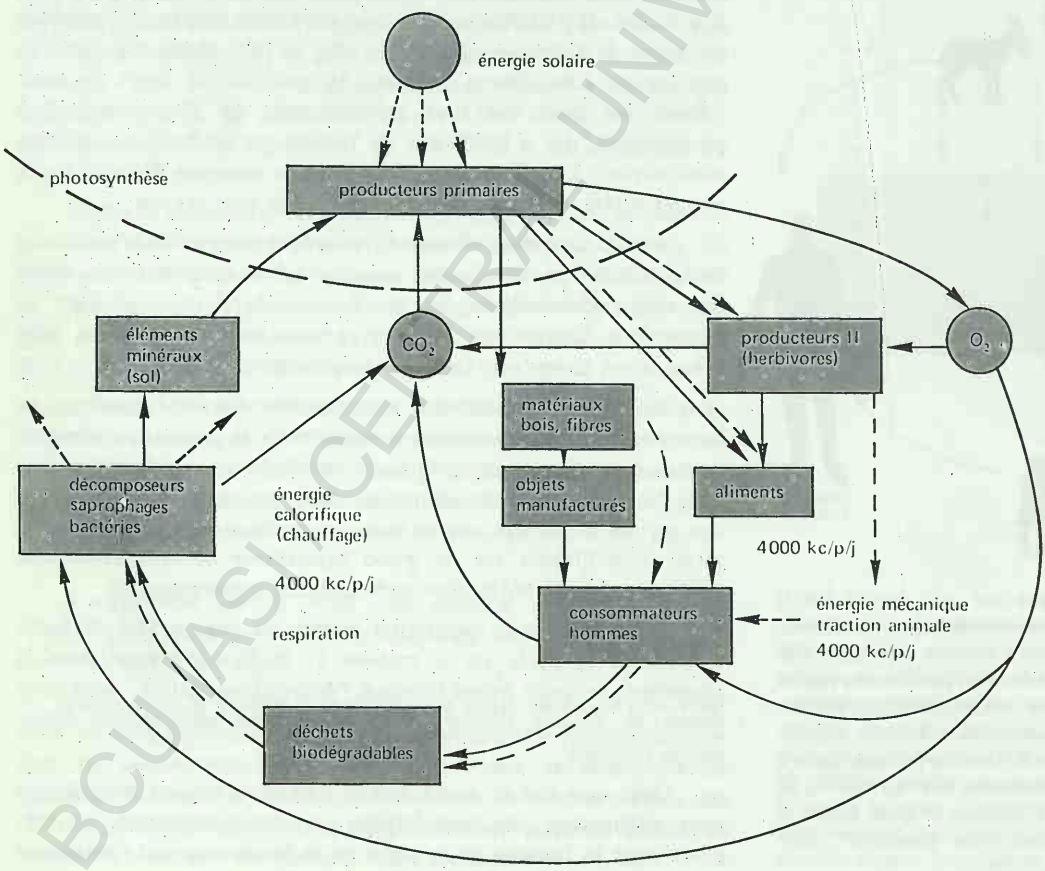
selon un modèle analogue à celui d'un écosystème naturel. On peut donc construire un diagramme général du flux d'énergie et du cycle de la matière dans une civilisation agraire, qui présentera une grande ressemblance structurale, bien que simplifié à l'extrême, avec ceux des autres écosystèmes.

Depuis l'apparition des premières civilisations agraires néolithiques jusqu'au milieu du XIX^{e} siècle, en Europe, l'écosystème humain était avant tout fondé sur l'exploitation de l'espace rural, avec un artisanat limité employant surtout des matériaux d'origine végétale donc biodégradables et une faible quantité de métaux corrodables.

La diversité de cet écosystéme, bien que simplifié, était encore élevée : prairies spontanées, friches, forêts, parcelles de faible surface en polyculture constituaient autant d'habitats peu ou pas modifiés.

Par ailleurs, un tel écosystème comportait ses producteurs primaires (végétaux cultivés ou spontanés) dont l'homme s'alimen-

Figure 2.2
Flux de l'énergie et cycle de la matière dans une civilisation agraire (explications dans le texte)



BCU LASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

tait soit directement, soit par l'intermédiaire de producteurs secondaires (animaux d'élevage, gibier etc.) et qui lui fournissaient la plupart des matériaux qu'il utilisait (bois, fibres végétales) (fig. 2.2). L'homme était le principal consommateur de cet écosystème dans lequel se développait aussi une biomasse considérable d'animaux sauvages. Toute la production que consommait notre espèce était transformée en déchets biodégradables détruits par la 3e catégorie d'organismes de la biocœnose, *les décomposeurs.* Ceux-ci dégradaient entièrement les déchets et les minéralisaient en composés simples (phosphates, nitrates et autres sels minéraux) lesquels étaient réutilisés par les autotrophes dans la photosynthèse, de même que le CO_2 dégagé. Ainsi le pouvoir autoépurateur des eaux et des sols jouait pleinement et le cycle de la matière dans l'écosystème n'était pas perturbé. Le flux d'énergie provenait de la lumière solaire et traversait l'homme sous forme chimique produite par le métabolisme des aliments consommés (environ 4 000 kcal/j/personne), auquel s'ajoutait une quantité d'énergie inférieure, ou tout au plus équivalente, utilisée par l'homme sous forme thermique (combustion du bois dans les foyers domestiques) et mécanique (traction animale).

L'énergie disponible était donc diluée, provenant de celle accumulée au cours d'une saison végétative par les producteurs primaires, ou tout au plus en quelques années, lors de la croissance des arbres servant de bois de chauffe. De plus, la quantité d'énergie disponible pour chaque individu était fort limitée. On l'estime à 10 000 kcal/personne/jour au Néolithique et à 22 000 kcal/p/jour à la fin du Moyen Age.

En définitive, l'écosystème humain présente dans une civilisation agraire un degré d'homéostasie élevée. Malgré les modifications ou les substitutions d'écosystèmes inhérentes à l'extension de l'agriculture, l'activité de l'homme dans une société rurale s'intègre à l'ensemble des cycles biogéochimiques et ne modifie pas le flux de l'énergie dans la biosphère, Il n'en est plus de même dans la civilisation technologique, comme nous allons le montrer dans ce qui suit.

La société technologique contemporaine et son impact sur la biosphère.

C'est au début du XVIIIe siècle que s'amorcèrent les premières transformations, qui ont permis l'épanouissement de la société technologique dans laquelle nous vivons aujourd'hui. A cette époque, la structure économique des principaux pays européens se modifie rapidement ; la découverte des premières machines industrielles, l'application de nouvelles techniques, favorisent la multiplication des manufactures. En même temps de nouvelles plantes cultivées sont introduites, tandis que se répandent des méthodes de culture et d'élevage plus efficientes. Toutes ces transformations constituent les prodromes d'un changement radical des rapports entre l'homme et la nature.

BCU IASI / CENTRUL DE RESURSE PENTRU ÎNVĂȚĂMÂNT

Celui-ci deviendra significatif au cours de la seconde moitié du XIX^{e} siècle avec le développement de l'industrie moderne. Si l'on examine maintenant la structure et le fonctionnement de l'écosystème humain dans la civilisation industrielle contemporaine, on constate qu'il se caractérise, en termes écologiques, par l'existence de trois sources de perturbations majeures, qui tendent à neutraliser son pouvoir homéostasique et à rompre de façon irrémédiable son équilibre spontané (Fig. 2.3).

La diversité des biocœnoses qui peuplent les milieux exploités par l'homme *se réduit de plus en plus.* Création d'espaces urbains entièrement artificiels, uniformisation de l'espace rural par extension de la monoculture industrielle sur de vastes surfaces, destruction des derniers vestiges de végétation spontanée, régression des forêts, anéantissement des habitats jugés inexploitables par notre espèce (marais). Quant à la biomasse animale non domestiquée, elle a été presque entièrement éliminée dans les régions "développées" du globe.

Cette perte de diversité, cause importante de déséquilibre, s'est accompagnée de deux autres phénomènes aux effets catastrophiques sur le fonctionnement de l'écosystème humain.

Le cycle de la matière est rompu car les déchets produits par l'homme ne sont plus dégradés, minéralisés par les décomposeurs. En effet, l'action des microorganismes du sol et des eaux est de plus en plus inhibée par les divers polluants fort toxiques qui les contaminent. Par ailleurs, l'industrie produit une multitude de substances non biodégradables sinon industructibles qui s'accumulent dans l'atmosphère, l'hydrosphère et les sols, perturbant le fonctionnement de la plupart des écosystèmes.

Cette accumulation incessante de déchets non recyclés dans divers biotopes se traduit par un bouleversement des cycles biogéochimiques. Aux divers éléments qui circulent dans la nature entre les divers milieux de la biosphère, l'homme est venu ajouter des quantités considérables de certains d'entre eux, produits de façon artificielle par l'industrie. Ainsi, l'usage massif et sans cesse accru des combustibles fossiles a déjà provoqué de profondes modifications dans les cycles du carbone et du soufre, et perturbé dans une moindre mesure celui de l'azote.

Mais l'homme puise aussi dans la lithosphère divers types de minéraux (à partir desquels il fabrique, par exemple, des engrais chimiques), des métaux peu fréquents dans la biosphère (comme le mercure), sinon absents de celle-ci dans les conditions normales et bien d'autres minéraux qu'il disperse dans l'air, les eaux et les sols à des tonnages considérables.

Cette accumulation incessante de résidus des plus variés présente, à long terme, de redoutables conséquences sur le plan écologique.

L'ampleur des problèmes posés par cette production de déchets dans la civilisation contemporaine, pas toujours apparente

BOJAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

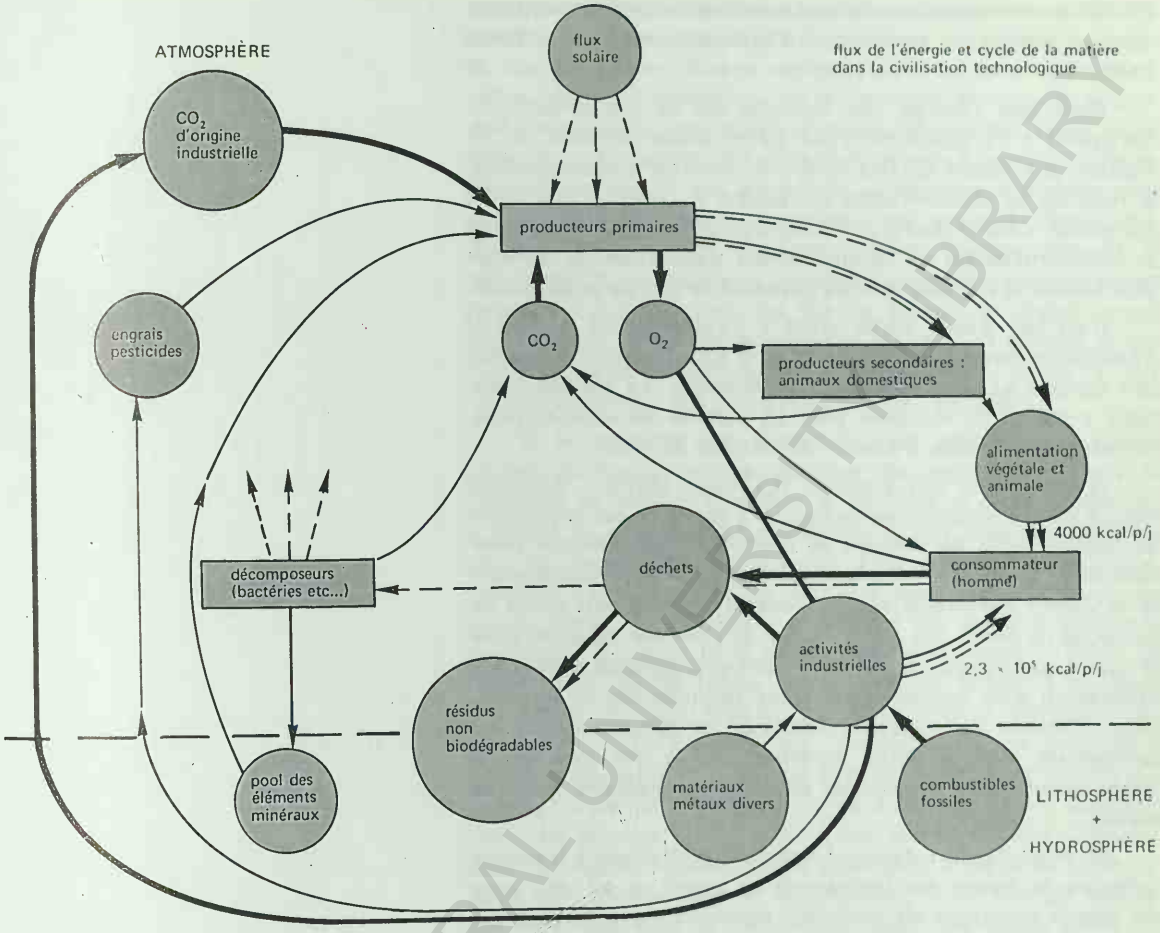


Figure 2.3

Flux de l'énergie et cycle de la matière dans la civilisation technologique contemporaine. Ce schéma met en évidence le considérable accroissement de la quantité d'énergie consommée par recours aux combustibles fossiles ($2,3 \times 10^5$ Kcal/personne et par jour), ainsi que la rupture du cycle de la matière, les déchets étant soit non biodégradables, soit mélangés à des résidus toxiques qui inhibent l'activité des décomposeurs (autres explications dans le texte)

pour le profane au point de vue biologique, est néanmoins nettement perçue par ce dernier dans le cas de certaines nuisances, comme l'entassement d'ordures ménagères ou d'autres résidus solides comme les épaves d'automobiles (1).

(1) Aux Etats-Unis, chaque habitant produit 2,5 kg de déchets par jour.

Le flux d'énergie est totalement modifié dans la société industrielle moderne. En effet, la civilisation occidentale en fait une consommation frénétique. Les Etats-Unis, par exemple, ne représentent que 7 % de la population mondiale. Ils ont consommé en 1970 le tiers de la production énergétique de l'ensemble du monde soit $2,2 \times 10^6$ megawatts sur un total de $6,6 \times 10^6$ megawatts ! Dans ce même pays, on estime à

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

230 000 kcal/personne/jour la consommation énergétique moyenne, obtenues surtout par combustion d'hydrocarbures fossiles (Cook, 1970).

Alors que l'énergie que l'homme tire de son alimentation correspond à l'exploitation d'une forme diluée, prélevée par les végétaux aux dépens du flux solaire au cours de la photosynthèse, le reste de sa consommation correspond à l'usage d'une forme concentrée. Celle-ci résulte de l'accumulation pendant des centaines de millions d'années de l'énergie solaire transformée par les végétaux fossiles et stockées dans les gisements de pétrole et de houille.

C'est en grande partie grâce à l'utilisation de ce capital d'énergie concentrée que l'homme a pu accroître aussi la production agricole au cours des dernières décennies. La traction mécanique a permis de récupérer pour les cultures de vastes surfaces, qui servaient autrefois à nourrir les animaux de trait.

Comme l'écrit fort à propos H.T. Odum (1970) : *"la cruelle illusion de la civilisation technologique a été de ne pas comprendre les moyens variés par lesquels les diverses formes d'énergie pénètrent dans le système complexe qui caractérise le fonctionnement de la société industrielle et ... alimente indirectement toutes les parties de ce réseau. La grande erreur de l'homme industriel a été de croire que l'augmentation des rendements agricoles était due à l'acquisition d'un nouveau savoir faire dans l'emploi du soleil ... c'était l'illusion car l'homme industriel ne consomme plus des pommes de terre produites seulement par la photosynthèse. Il mange maintenant des pommes de terre partiellement faites de pétrole".*

En effet, l'apport d'énergie non photosynthétique à la culture s'effectue au travers des instruments de travail du sol, de l'usage des engrais chimiques, de pesticides, également synthétisés grâce à l'énergie des combustibles fossiles.

Si l'on examine maintenant l'évolution de la demande énergétique dans le monde au cours du dernier siècle, on constate que celle-ci croît à un tel rythme que le problème des ressources se pose déjà en termes graves pour le pétrole et le gaz naturel. L'accroissement de la consommation s'effectue selon une loi exponentielle. De l'ordre de 2,5 % par an en 1850, celui-ci était de 5 % par an en 1950 et s'élève à 9 % par an aujourd'hui (Hubbert, 1969). Cette augmentation effrénée de la consommation d'énergie dans la civilisation industrielle nous permet de prendre conscience d'un autre problème, tout aussi préoccupant que celui des pollutions, celui de l'épuisement des ressources non renouvelables et, de façon plus générale, de la surconsommation des ressources de la biosphère. Ces phénomènes sont eux-mêmes accentués par la croissance démographique sans cesse accélérée, dans laquelle s'est engagée l'humanité.

Il faut le proclamer tout haut : la finalité de l'expansion et de la croissance industrielle maximales, érigée en dogme par la pensée

sociologique occidentale (de même que le libéralisme en matière d'économie) constituent autant d'inepties et d'absurdités au point de vue écologique. Aucune espèce vivante ne peut exploiter le milieu naturel au mépris des lois du recyclage des éléments et à un taux incompatible avec la pérennité des biocœnoses. Toute population qui effectue des prélèvements supérieurs à la productivité de l'écosystème auquel elle appartient —c'est-à-dire consomme non seulement l'intérêt mais le capital— est vouée à l'extinction. Envisager la possibilité de l'accroissement ininterrompu de la consommation *per capita* de populations humaines elles-mêmes en perpétuelle expansion est une vue de l'esprit, un mythe auquel seuls peuvent croire des technocrates ignorants en biologie et qui n'ont pas encore compris (le comprendront-ils jamais ?) que *l'homo economicus* fait partie intégrante de l'écosphère.

Si le problème des ressources n'est peut-être pas encore brûlant d'actualité dans le domaine des approvisionnements de l'industrie en matières premières, il l'est déjà, et depuis longtemps, à l'égard de la production alimentaire et pas seulement dans les pays du tiers-monde, à l'encontre d'une opinion fort répandue. Combien d'entre nous ont-ils oublié la disette qui sévit dans une grande partie de l'Europe —coupée de ses approvisionnements extérieurs— au cours de la seconde guerre mondiale ? Est-ce un hasard si la famine frappa la Hollande en 1944 ? L'existence d'excédents agricoles évoquée par certains pour contredire des conceptions qu'ils jugent à tort "malthusiennes" ne tient pas à l'analyse. En réalité, il existe des pays industriellement avancés qui peuvent se permettre d'acquérir, grâce à leurs excédents commerciaux, les aliments qu'ils ne produisent pas en quantité suffisante dans des régions surproductrices. Cependant, si certaines zones du globe sont excédentaires et exportatrices, il ne faut pas oublier que, non seulement le tiers-monde, mais une bonne partie de l'Europe et le Japon ont une production alimentaire inférieure à leurs besoins et que le bilan global des ressources est déjà déficitaire pour l'ensemble de l'humanité. Dumont (1967) estimait à 1,6 milliard le nombre total d'hommes atteints de malnutrition, soit la moitié de la population mondiale d'alors et il ne semble pas que l'on ait observé depuis une amélioration sur ce point, malgré ce qu'on appelle la "Révolution verte".

Comment ne pas être effrayé lorsque des chefs de gouvernement d'Amérique latine déclarent qu'il n'y a pas de problème démographique dans leurs pays (Cf. *Revue de la F.A.O.*, CERES, n° 5 vol. 4, 1972) ? Récemment n'a-t-on pas affirmé, lors d'un Colloque international réunissant des experts européens et américains dans le domaine de l'économie et du développement industriel, qu'une humanité de 20 milliards d'individus n'aurait pas de problèmes de ressources ? Ces experts ignoraient-ils que, dès 1962, des évaluations effectuées par des hydrogéologues montraient que ce chiffre ne pourrait pas être atteint à cause du manque de disponibilité en eau (R. Furon, 1963) ? Ont-ils pris en considération l'ampleur et la

BCU IASI / CENTRU UNIVERSITAR

multiplicité des nuisances auxquelles sera exposée une population mondiale six fois supérieure aux effectifs actuels ? Enfin, pourraient-ils expliquer comment on fournira à tous les hommes la quantité de protéines animales dont ils auront besoin, alors que ces dernières font déjà cruellement défaut aujourd'hui ?

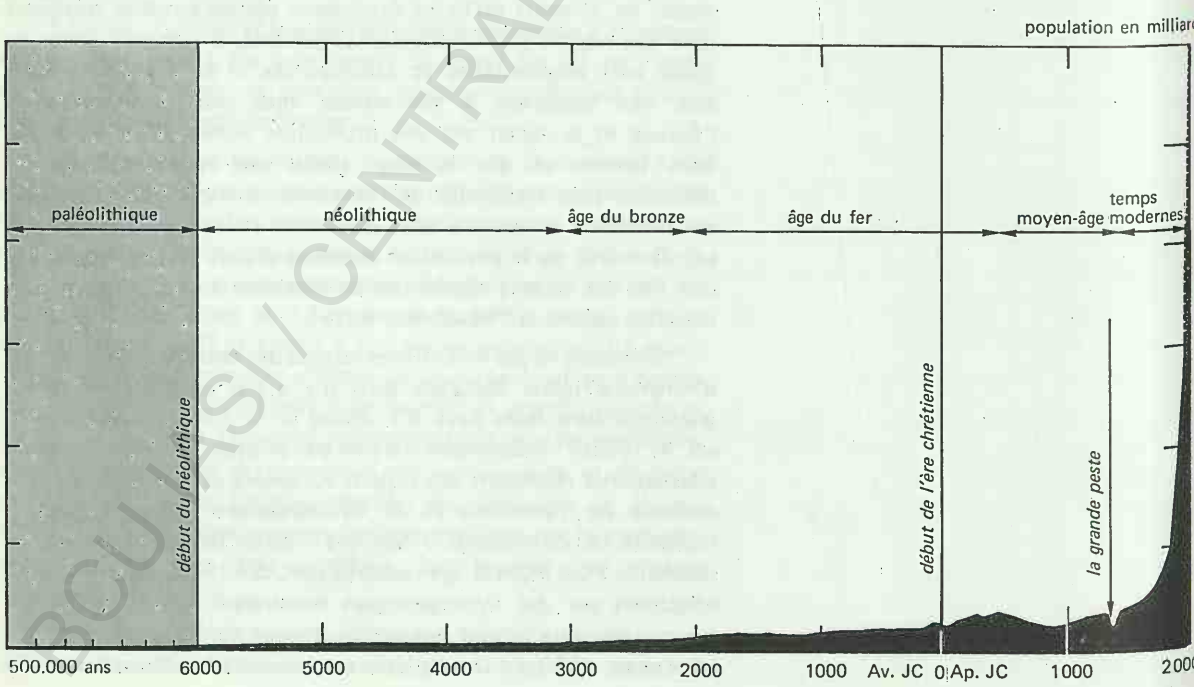
Toutes ces considérations nous conduisent à examiner l'autre fait essentiel qui caractérise l'impact de l'homme sur la biosphère et lui confère toute son ampleur : l'explosion démographique contemporaine.

L'EXPLOSION DEMOGRAPHIQUE HUMAINE

Histoire démographique de l'humanité

La multiplication inconsidérée de l'espèce humaine constitue, tout autant que son développement technologique, un facteur primordial de dégradation de la biosphère.

Figure 2.4
Croissance des effectifs de l'espèce humaine depuis le paléolithique jusqu'à nos jours, figurée en échelle arithmétique. Il a fallu un million d'années à l'homme pour atteindre un effectif de 3×10^9 individus (en 1960), en trente ans seulement, il doublera cette valeur (plus de 7×10^9 habitants en l'an 2000 sur la base des plus récentes données statistiques). On voit que le terme "d'explosion démographique" n'est pas usurpé. D'après Population Bulletin, "How many people have ever lived on earth ?", vol. XVIII, n° 1, février 1962 p. 5



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Bien que le surpeuplement sévisse depuis plusieurs siècles en certaines régions du continent asiatique, l'accroissement accéléré d'une population mondiale déjà trop nombreuse constitue un fait essentiel, spécifique de notre époque, que l'on a dénommé fort à propos l'explosion démographique du XX^{e} siècle. Celle-ci dépasse peut-être, par ses conséquences prévisibles, l'importance de découvertes scientifiques telles que celle de l'énergie nucléaire ou de la cybernétique.

En 1971, les experts de la démographie mondiale ont estimé à 3 706 millions de personnes les effectifs de la population du globe, et à 2,1 % par an leur vitesse d'accroissement (1).

(1) *Annuaire démographique des Nations Unies,* édition de 1971 (Déc. 1972).

Le surpeuplement humain de la biosphère apparaît dans toute son ampleur si l'on songe qu'une densité de 26 habitants par km^2 est déjà dépassée sur l'ensemble des continents émergés (déserts et zones polaires inclus !).

A l'action dégradante de multiples acquis technologiques se surajoute cette pression exagérée sur l'espace disponible pour les cultures et la production alimentaire, incompatible avec la pérennité des écosystèmes naturels et même de ceux modifiés ou créés par l'homme au cours des temps.

Fait plus grave, non seulement le poids démographique de l'homme sur la biosphère est déjà excessif en valeur absolue, mais il s'accroît à une vitesse exponentielle. Aucun expert ne peut aujourd'hui encore prévoir si les effectifs de l'humanité se stabiliseront et encore moins à quel niveau ! Aussi, J. Dorst (1965) a-t-il pu comparer à juste titre l'explosion démographique du XX^{e} siècle à un phénomène d'ampleur comparable aux plus grandes catastrophes géologiques qui aient bouleversé la surface de la planète.

L'histoire démographique de l'humanité est aujourd'hui connue dans ses grandes lignes malgré l'absence de documents historiques avant 1650. Diverses recherches paléontologiques et archéologiques ont permis de faire des estimations assez précises des effectifs, même pour les lointaines époques paléolithiques.

Si l'on admet que les premiers représentants du genre *Homo* apparurent il y a environ 1 700 000 ans, on peut estimer qu'entre 60 et 100 milliards d'êtres humains ont vécu sur notre planète. Dans ces conditions, les effectifs actuels représentent au moins 5 % du nombre total des hommes qui l'ont habitée !

Le tableau VIII emprunté à Deevey (1960) mais modifié, montre qu'au cours des temps, l'humanité a colonisé peu à peu tous les habitats continentaux, au fur et à mesure que sa population s'accroissait.

Les australopithèques puis les premiers paléanthropiens apparurent en Afrique, où leurs effectifs ne dépassaient pas 125 000 individus il y a un million d'années. Pendant le paléolithique inférieur et moyen, la population humaine augmente lentement et occupe de façon progressive tout l'ancien monde. Le cap du premier million d'individus fut atteint il y a 100 000 ans.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau VIII – Histoire démographique de l'humanité (d'après Deevey, 1960, modifié)

Date	*Epoque ou culture technologique*	*Continent peuplé*	*Densité en habitants/km²*	*Nombre total d'hommes*
-10^6	Paléolithique inférieur	Afrique	0,00425	125 000
-10^5	" moyen	Ancien Monde	0,012	10^6
– 25 000	" supérieur	"	0,04	$3{,}34 \times 10^6$
– 10 000	Mésolithique	tous	0,04	$5{,}32 \times 10^6$
– 6 000	" moyen	"	1	$26{,}5 \times 10^6$
– 2 000	Société urbaine (Rome et Chine impériale)	"	1	133×10^6
– 320 (1650)	Début des temps modernes	"	3,7	545×10^6
– 160 1800)	Début de l'ère industrielle	"	6,2	906×10^6
– 20 (1950)	Ere atomique	"	16,4	$2{,}4 \times 10^9$
– 10 (1960)	Exploration du cosmos	"	20	3×10^9
0 1970)	Expansion de l'informatique	"	26	$3{,}66 \times 10^9$
+ 30 (2 000)	Société cybernétique	"	50	$7{,}5 \times 10^9$
+ 45 (2 015)	Société post-industrielle (ou catastrophe ?)	"	83	$10{,}5 \times 10^9$

les densités ont été calculées par rapport à l'ensemble des continents émergés, déserts et calottes glaciaires inclus.

Le Nouveau Monde fut à son tour colonisé au cours du Paléolithique supérieur. A la fin de celui-ci, il y a 10 000 ans, à l'aube du Néolithique, les effectifs de l'humanité comptaient 5 millions de personnes.

La naissance de civilisations sédentaires et agricoles, qui caractérise cette époque, s'accompagne d'une forte croissance démographique, qui porta la population du globe à 150 millions d'habitants au début de l'Empire romain.

Du début de l'ère chrétienne à l'avènement des temps modernes l'accroissement se poursuit pour atteindre 545 millions d'individus en 1650. Cependant, au cours de cette période, les effectifs de l'espèce humaine vont avoir tendance à s'accroître, tout en présentant des fluctuations de forte amplitude. Divers facteurs vont intervenir pour augmenter la mortalité naturelle qui se résument en la funeste trilogie : guerre, famine, épidémie. Certes, ces catastrophes découlent en grande part des vicissitudes politiques et des désordres engendrés par les conflits armés. Mais d'autres causes de disette et de maladie résident en l'importance des densités de population déjà atteintes tant en Occident qu'en Chine et aux Indes, en la médiocrité des techniques de production agricole et dans les nombreux brassages de population qui favorisèrent l'extension des pandémies à partir de l'époque des grandes invasions.

CSUSB CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Figure 2.5

Répartition de la population mondiale en cinq groupes compte tenu des densités déjà atteintes et des taux de croissance observés. Aux pays du tiers-monde à fort coefficient d'accroissement, situés pour la plupart dans les zones intertropicales, s'opposent les pays industrialisés, des régions tempérées, dont l'accroissement est faible et même nul dans certains cas. La Chine, principale nation de la terre par son importance numérique, occupe actuellement une position intermédiaire entre l'Europe et le tiers monde avec de fortes densités et un taux d'accroissement moyen. D'après Population Studies n° 41, "World population prospects", Nations Unies, New York 1966.

Le tableau IX rapporte quelques-unes des grandes catastrophes qui sévirent dans l'ancien monde au cours de notre ère, et réduisirent dramatiquement les effectifs de diverses populations.

A partir du XVIII[e] siècle, on note une forte croissance démographique. Celle-ci résulte, pour une grande part, de l'introduction de nouvelles cultures (pomme de terre par exemple) et de techniques qui permirent une élévation des rendements agricoles. Toutefois, les guerres et les famines continuèrent à sévir bien au-delà. L'ère pastorienne n'a d'ailleurs pas encore mis un terme définitif aux épidémies, ainsi qu'en atteste l'extension de la dernière pandémie cholérique. Faut-il rappeler enfin les cinquante millions de morts de la seconde guerre mondiale ; les nombreuses disettes qui ont frappé les pays du tiers monde depuis 1945, — celles du Biafra et du Pakistan par exemple ?

Cependant, quelle que fut la gravité des événements ici évoqués, ils n'eurent jamais, eu égard à la population totale des époques considérées, l'ampleur des famines et autres fléaux qui ravagèrent l'Europe au cours de la première moitié du second millénaire. Walford (1878), (selon Ehrlich, 1970), dénombrait pas moins de 200 famines en Grande Bretagne au cours de notre ère, la dernière en 1846 ! On en a recensé 1 828 en Chine en 2 019 ans ; certaines d'entre elles firent périr plusieurs millions d'hommes !

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau IX

Date	*Localité*	*Evénement*
331	Antioche	Famine terrible, le boisseau de blé est vendu 400 pièces d'argent
695-700	Angleterre et Irlande	Peste et famine pendant 3 ans, nombreux cas de cannibalisme
1193-96	Angleterre, France	Pluies incessantes et famines consécutives
1348-1350	Europe	Peste bubonique, 20 millions de morts !
1412-1413	Indes	Inondations et famines dans le delta du Gange
1600	Russie	Famine et peste, plus d'un million de morts dont 500 000 de maladie
1769-1770	Indes (Hindoustan)	Première grande famine indienne dont on ait une relation précise, au moins 3 millions de morts
1770	Bohême	Famine et peste, environ 170 000 morts
1790	Indes	Famine dans le district de Barda, des adultes dévorent des enfants
1877-78	Chine septentrionale	Une famine épouvantable affecte 4 provinces et 70 millions de personnes. Plusieurs millions de morts. Vente des femmes et des enfants. Une petite fille s'échange pour 2 dollars, certains parents tuent leurs enfants pour abréger leurs souffrances (Walford, 1876)
1891-94	Inde et Europe	Grande pandémie cholérique qui parvient jusqu'en Europe, plusieurs millions de morts
1943	Indes (Bengale)	Famine. Trois millions de morts

Aux Indes, la première grande famine dont on ait trouvé une relation précise se situe en 1769-70 et fit 3 millions de morts.

De même, les épidémies firent des ravages au cours du second millénaire dans les populations de l'ancien monde.

La grande peste du XIV^{e} siècle, qui sévit à l'état endémique en Europe pendant plus de 50 ans, fit 22 millions de morts entre 1348 et 1350. Elle causa en deux ans une réduction de 25 % de la population de ce continent ! Pendant la même époque, plusieurs épidémies de peste bubonique diminuèrent de moitié le nombre d'habitants de la Grande Bretagne entre 1348 et 1379, lequel tomba de 3,2 à 2,1 millions de personnes (Langer, 1964). Estimée à 85 millions d'individus au début de cette pandémie, la population européenne n'en comptait plus que 60 millions à la fin du XIV^{e} siècle ! .

Si les autres peuples de l'ancien monde payèrent un lourd tribut aux affections épidémiques pestilentielles (peste, choléra, typhus, variole, etc . . .), c'est en Europe que l'homme eut certainement le plus à souffrir des guerres au cours de l'ère chrétienne. A partir des grandes invasions (375-568), qui consommèrent la ruine de l'empire romain, aucun siècle ne s'écoula sans son cortège de misères issues des conflits armés. En particulier, les

guerres de cent ans (1337-1453) et de trente ans (1618-1648) s'accompagnèrent de massacres de populations civiles, sinon de génocides, dont l'ampleur ne fut limitée que par la faiblesse des moyens d'extermination dont disposaient les belligérants d'alors. La guerre de trente ans provoqua la mort du tiers des habitants de l'Allemagne et de Bohême : plus de 20 000 personnes périrent par exemple au cours du seul siège de la ville de Magdebourg, au cours duquel les catholiques les massacrèrent sans distinction de sexe ni d'âge.

A partir du XVIII[e] siècle, l'essor démographique humain devient plus régulier et soutenu, en particulier parmi les populations européennes. Si les progrès de la technologie agricole (1) et l'émigration d'une fraction d'entre elles vers le nouveau continent permettent d'expliquer ce fait, il est plus difficile d'interpréter l'accroissement important observé en Chine et aux Indes à la même époque.

(1) Ceux-ci se caractérisent par exemple par la découverte des engrais verts, cultures de légumineuses comme le trèfle qui enrichissent le sol en azote nitrique et permettent ainsi d'abandonner la pratique de la jachère. Citons aussi l'introduction de nouvelles plantes cultivées : outre la pomme de terre, d'autres espèces hautement productives comme le maïs furent répandues à cette époque. Enfin, c'est au XVIII[e] que prit naissance la pratique de la sélection de races d'animaux domestiques à haut rendement en lait ou en viande.

On évalue à 906 millions d'individus les effectifs de l'espèce humaine en 1800. Le milliard fut atteint en 1840.

Avec l'avènement de l'ère pastorienne, qui élimina de nombreux facteurs de mortalité, l'accroissement s'accéléra très vite, On passe à deux milliards d'hommes en 1930, 3 milliards en 1962 et 3 706 milliards en 1971.

Si l'on trace la courbe qui traduit l'accroissement des effectifs de l'humanité en fonction du temps, on obtient un diagramme en forme de J dont la branche verticale s'inscrit en totalité dans l'intervalle de temps commençant en 1900 (Fig. 2.4). L'examen de cette courbe révèle combien le terme d'explosion démographique est justifié.

L'homo sapiens, dont la différenciation se situe il y a environ 600 000 ans, a mis un demi-million d'années pour passer de quelques centaines de milliers à un milliard d'individus. Mais il lui a suffit de 50 ans pour doubler ses effectifs et passer de 1,8 à 3,6 milliards (entre 1920 et 1970 !).

Autre fait capital, non seulement le nombre total d'êtres humains s'est accru de façon continue, malgré quelques fluctuations accidentelles, mais encore sa vitesse d'accroissement augmente avec le temps.

Tableau X

Date	*Population estimée*	*Temps de doublement*
– 35 000	$2{,}5 \times 10^6$	env. 25 000 ans
– 10 000	$5{,}3 \times 10^6$	2 000 ans
– 2 000	133×10^6	env. 800 ans
– 320 (1650)	500×10^6	200 ans
– 120 (1850)	1×10^9	
– 45 (1925)	2×10^9	75 ans
+ 5 (1975)*	4×10^9	50 ans

* Evaluation pour 1975 selon l'hypothèse haute des Nations Unies dans leurs prévisions de 1963 confirmée par la réalité les 4×10^9 ayant-été atteints à la fin de 1975.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le Tableau X nous montre comment a varié depuis la préhistoire jusqu'à nos jours la durée nécessaire pour que doublent les effectifs de notre espèce.

Si l'on tient compte de l'accroissement démographique observé en 1969-1971, on en déduit une valeur actuelle des temps de doublement de 32-35 ans.

L'accélération de la croissance démographique de l'humanité est aussi remarquablement mise en évidence par l'énorme réduction du temps nécessaire pour que ses effectifs s'accroissent d'un milliard d'individus (Tableau XI).

Tableau XI – Temps nécessaire pour que la population mondiale augmente de 10^9 personnes

Accroissement des effectifs	*Années*	*Durée*
de 125 000 à 1 milliard	de -10^6 à 1850	env. 10^6 années
1 à 2 milliards	de 1850 à 1925	75 ans
2 à 3 milliards	de 1925 à 1960	35 ans
3 à 4 milliards	de 1960 à 1975	15 ans
4 à 5 milliards	de 1975 à 1985	10 ans

Ainsi que le faisait remarquer, il y a quelques années, le démographe américain Vogt, l'accroissement de la population humaine s'effectue à un rythme supérieur à celui du coeur humain. En effet, ce dernier bat 38 millions de fois par an, alors que l'excédent de natalité s'élevait de 50 millions d'individus à cette époque ; chaque mois la population mondiale s'accroît d'une ville plus peuplée que Chicago (4,5 millions d'habitants). La croissance démographique de l'Inde excède chaque année le total du peuplement de l'Australie. Son rythme annuel d'accroissement est de 2,6 % avec un temps de doublement de 27 ans, de sorte que la population du sous-continent indien atteindra le milliard d'habitants en 1993, sauf catastrophe.

Si l'on examine maintenant la répartition de la population mondiale, on constate que l'on peut distinguer cinq grandes zones (Fig. 2.5). au point de vue démographique :

1) L'Europe, qui présente une forte densité et une faible croissance ;

2) L'ensemble Sibéro-Nord américain, de faible densité et de faible croissance ;

3) l'Amérique centrale et tropicale, l'Afrique, le Proche et le Moyen-Orient, de faible densité et de forte croissance ;

4) l'Inde, la Chine et l'Asie du Sud-Est, de forte densité et de forte croissance ;

5) l'Océanie et l'Amérique du Sud tempérée, de très faible densité et de faible croissance.

BOUVIER UNIVERSITY LIBRARY

Le record de surpeuplement effectif appartient sans doute à la R.A.U. où 35 millions de personnes s'entassaient en 1971 sur les 35 000 km^2 de surface utile constituée par la vallée du Nil, le reste de l'Egypte n'étant qu'un désert incultivable. Ceci correspond à une densité réelle de l'ordre de 1 000 habitants par km^2.

La Hollande, le Japon, l'Indonésie, le Bengale, figurent parmi les pays de plus forte densité, dans chacun d'entre eux, celle-ci excède 300 habitants/km^2. Dans certaines zones de delta du Gange, recouvertes il y a seulement un siècle par une jungle inhabitée et impénétrable, on dénombre aujourd'hui plus de 600 habitants/km^2.

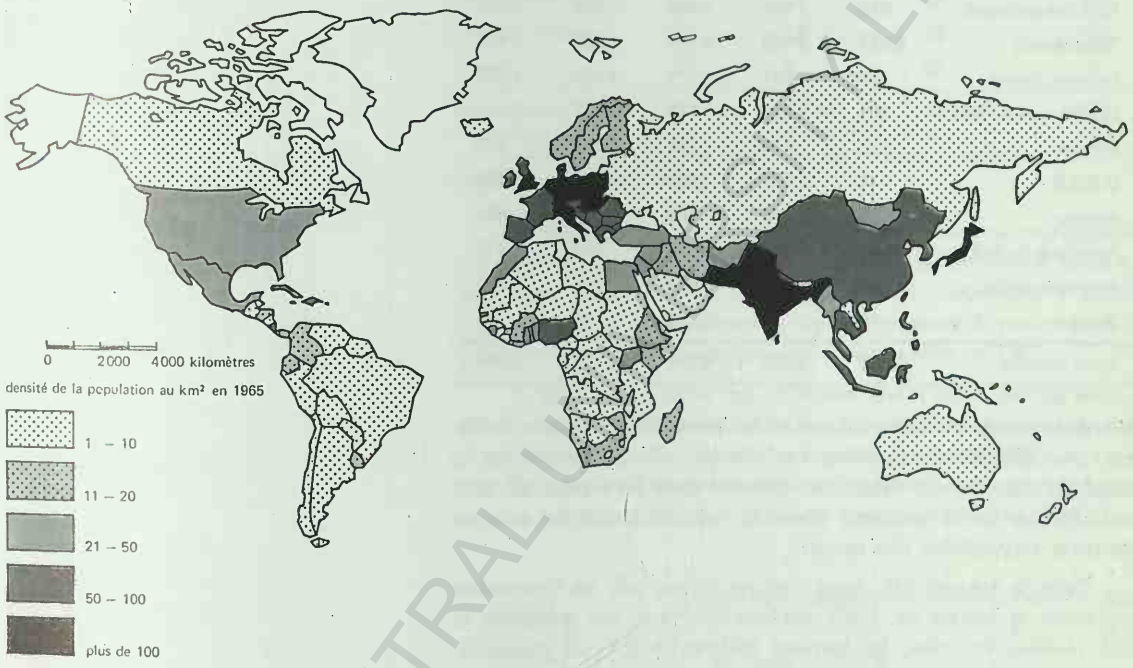


Figure 2.6
Répartition de la densité des peuplements humains dans le monde. D'après Bogue "Principles of Demography", Wiley 1969

La figure 2.6 résume la répartition de la densité du peuplement humain sur les divers continents. Il est important de noter que les zones de forte densité ne se limitent plus à l'Europe et à l'Asie orientale, En Afrique, par exemple, on dénombre déjà plus de 130 habitants/km^2 au Ruanda.

Le tableau XII résume les prévisions du département des affaires sociales et économiques des Nations Unies, effectuées en 1963, sur l'évolution de la population mondiale jusqu'à la fin du siècle. Il s'agit là d'une prospective fondée d'après les données démographiques antérieures remontant à 1960. Trois hypothèses furent alors établies. L'hypothèse moyenne avait pour objet de représenter l'évolution de la population humaine dans l'avenir, qui paraissait la plus probable, compte tenu de l'expérience passée et des observations dans les dernières années précédant les prévisions. Les hypothèses basses et hautes correspondaient aux limites inférieures et supérieures de ces prévisions et peuvent être interprétées

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XII– Evolution de la population mondiale entre 1960 et 2000, d'après les prévisions démographiques effectuées en 1963 par les Nations Unies ; colonne de gauche : hypothèse "moyenne", colonne de droite : hypothèse "haute"

Régions	*Effectifs dénombrés et prévus en millions d'habitants*				
années	1960	1980		2000	
		M	H	M	H
Pays industrialisés	976	1 194	1 245	1 441	1 574
Tiers Monde	2 021	3 136	3 306	4 668	5 420
Extrême Orient	794	1 041	1 171	1 287	1 623
Inde + Asie du Sud	865	1 420	1 448	2 171	2 443
Europe	525	479	498	527	563
U.R.S.S.	214	278	296	353	403
Afrique	273	449	463	768	864
Amérique du Nord	199	262	275	354	376
Amérique latine	212	378	383	638	686
Océanie	16	23	23	32	35
Total mondial	2 998	4 330	4 551	6 130	6 994

comme une indication de l'étendue de l'erreur d'estimation. Toutefois, une quatrième hypothèse fut réalisée, elle se fondait sur le maintient du taux de fécondité, observé dans les années 50 avec prolongation de la tendance observée lors du déclin du taux de mortalité (Hypothèse très haute).

Dans le tableau XII, nous n'avons retenu que les hypothèses moyennes et hautes de 1963. Malheureusement, ces prévisions se sont révélées erronées, les derniers chiffres dont nous disposons, ceux de 1971, nous montrent qu'il faut les reviser en hausse puisque la population du globe s'élevait alors à 3,706 milliards d'habitants, chiffre légèrement supérieur à l'hypothèse haute des Nations Unies. Sur ces bases récentes, c'est à 8 milliards que les experts évaluent la population du globe en l'an 2000 et non à 7 milliards.

En réalité toutes les prévisions démographiques, toutes les prospectives effectuées depuis la fin de la seconde guerre mondiale ont péché par défaut. Ehrlich (1970) rapporte que *Time* mentionnait dans son numéro du 8 novembre 1948 *"l'opinion d'experts selon lesquels les prédictions faites par la FAO sur une population mondiale de 2,250 milliards en 1960 étaient probablement trop élevées"*. La population recensée à cette date fut de 3 milliards ! D'autres prospectives effectuées par divers économistes et démographes en 1950 fixaient celle-ci à 3,5 milliards d'habitants en 1990. On sait que ce chiffre était déjà dépassé à la fin de 1970 (3,660 milliards).

Tableau XIII – Etat de la démographie mondiale en 1971 (d'après *"Population Reference Bureau"*, Washington, 1972)

Régions	*Population en millions*	*Taux accroissement annuel*	*Temps de doublement*	*Prévisions pour 1985*
Afrique	354	2,7 %	26 ans	530
Asie	2 104	2,3	31	2 874
U.R.S.S.	245	1	70	287
Europe	466	0,8	88	515
Amérique du Nord	229	1,2	58	280
Amérique latine	291	2,9	24	435
Océanie	20	2	35	27
Total mondial	3 706	2,0 %	35 ans	4 933

Ce total tient compte des migrations non prises en considération dans les évaluations partielles ci-dessus.

Le tableau XIII réunit les principales données démographiques relatives à la population mondiale en 1971 et les prévisions faites sur ces bases pour 1985 ; elles confirment largement l'opinion d'Ehrlich sur la sous-estimation de sa croissance à venir, si on les compare à celles effectuées par les Nations-Unies en 1963.

Il apparaît, d'après ces données que l'écart démographique entre les pays industrialisés et le Tiers-Monde. continuera à se creuser au cours des prochaines années. D'ici l'an 2000, le continent Africain et l'Amérique Latine tripleront leurs effectifs, tandis que la population européenne tendra à se stabiliser (Fig. 2.7).

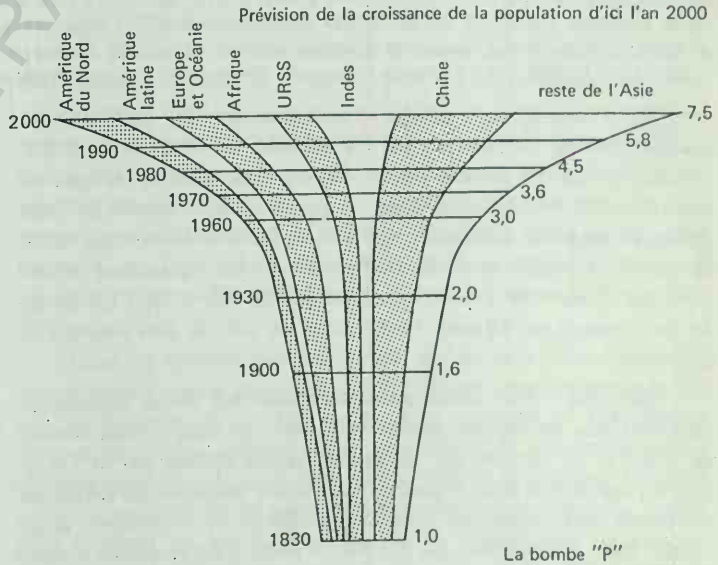


Figure 2.7
Prévision des variations dans la croissance démographique des principales régions du monde d'ici l'an 2000 (Source : département d'Etat U.S. in "Environmental quality", US Government Printing Office, Washington 1970, p. 150).

La bombe "P"
source "dépt. d'état" U.S.

DU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

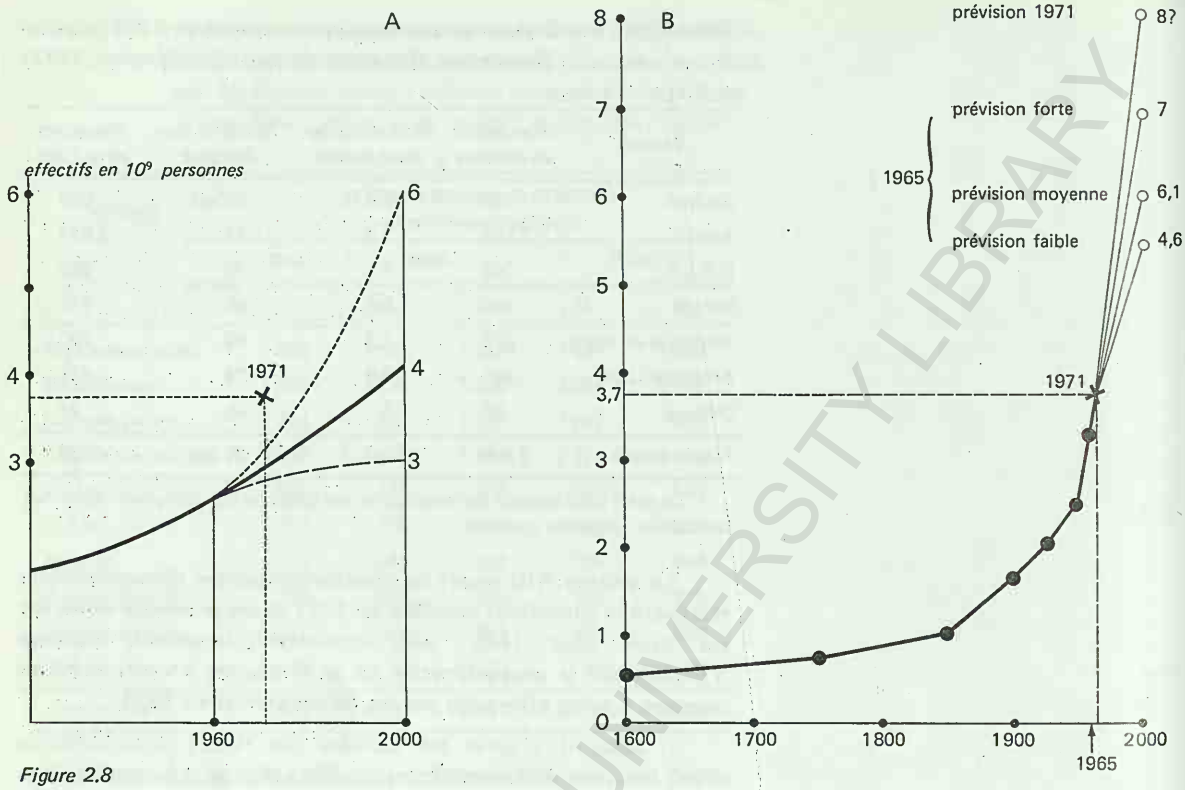


Figure 2.8

Tendance systématique à la sous-estimation de la croissance démographique dans les diverses prévisions effectuées jusqu'à présent par les experts des Nations-Unies.

La figure A représente les prévisions faites sur la base des statistiques démographiques antérieures à 1960. La figure B celles effectuées sur les données des Nations Unies de 1965. La croix indique sur chaque figure les effectifs réels de l'humanité en 1971 ($3{,}7 \times 10^9$ personnes). On voit que le maximum prévu en 1960 pour l'an 2000, devait être révisé en hausse dès 1965, les données statistiques de cette année laissant prévoir 7×10^9 habitants à cette date. Cette dernière prospective est elle-même sans doute inférieure à la réalité car les chiffres les plus récents (1971) suggèrent qu'un effectif de 8×10^9 personnes est des plus probable en l'an 2000 si persiste la tendance actuelle. (A, d'après Thoday in *Hutchinson "Population and food resources", Cambridge U.P.,1969 p. 9 ; B, d'après Kormondy "Concepts of Ecology" Prentice Hall 1969, p. 167)*

Alors que le taux annuel d'accroissement est de 0,8 % en Europe (temps de doublement de 88 ans), de 1 % en U.R.S.S. (70 ans) et de 1,2 % aux Etats-Unis (63 ans), celui-ci est égal ou supérieur à 2 % pour l'ensemble du tiers-monde. Il atteint 2,7 %en Afrique (temps de doublement 26 ans) et 2,9 % en Amérique latine (24 ans). Le record mondial de l'expansion démographique appartient au Costa-Rica avec un taux annuel de 3,8 % (soit un temps de doublement de 19 ans). Le Mexique le suit de près avec 3,4 % et 21 ans.

Bien que l'Asie présente un accroissement de sa population plus lent que les régions précédentes (avec un taux annuel moyen de 2,3 %), ce dernier est en grande partie abaissé par la Chine (1,8 %) qui a mis depuis peu en œuvre une politique concertée de limitation des naissances. Celle-ci procèderait de méthodes "originales" telle l'imposition des familles à partir d'un troisième enfant au prorata du surnombre !

DUKE UNIVERSITY LIBRARY

A l'opposé, l'inflation démographique sévit aux Indes (avec un temps de doublement de 27 ans) en Malaisie (23 ans) et au Pakistan (21 ans).

De façon simultanée à cet accroissement de plus en plus rapide de l'humanité se manifeste une forte tendance à l'urbanisation. Tokyo, dont l'agglomération était peuplée de 16 millions d'habitants en 1970, atteindra 40 millions en l'an 2000. Calcutta où règnent aujourd'hui une misère et une disette chroniques et qui est peuplée de 8 millions d'habitants, comptera 50 millions de personnes en l'an 2000 si le rythme actuel de croissance se maintient. Dans cette même hypothèse, la moitié de la population mondiale vivra dans des villes en 1984 et sa quasi totalité en 2020.

A cette époque, la moitié de la population occuperait des villes de plus d'un million d'habitants. Dans les mêmes perspectives futuristes, si l'on extrapole la tendance actuelle à l'urbanisation, la plus grande "ville" du globe comptera 1,4 milliard de citadins en 2044 !

Divers écologistes contemporains voient en cette évolution démographique de l'humanité une confirmation des vues de Malthus. Dès 1798, ce dernier dans son *"Essay on the principle of population"*, considérait que la multiplication sans limite de l'espèce humaine la conduisait peu à peu vers un état de famine catastrophique. Malthus écrivait dans son ouvrage *"The power of population is infinitely greater than the power of the earth to produce subsistence for man* (1)". Il insistait sur le fait que le nombre d'être humains croissait en progression géométrique alors que les ressources alimentaires ne pouvaient augmenter que selon une loi linéaire et dans d'étroites limites – celles de l'occupation totale des terres disponibles.

(1) Les possibilités d'accroissement d'une population sont infiniment plus grandes que celles du sol pour produire la nourriture de l'homme.

De nombreux auteurs contemporains voient dans la dramatique réduction du temps de doublement des effectifs et dans le douloureux problème de la malnutrition du tiers-monde une confirmation des prophéties pessimistes de Malthus. Ehrlich par exemple, prévoit que l'expansion démographique contemporaine ne se poursuivra pas aussi longtemps que ne le pensent les experts démographes des Nations Unies. Il considère comme peu probable une humanité de 10 milliards d'individus prévisible pour la première décennie du XXI^{e} siècle. Selon Ehrlich, *"une élévation drastique du taux de mortalité ralentira ou mettra un terme à l'explosion démographique".*

Nous ne sommes pas convaincus par de telles thèses. Hormis une troisième guerre mondiale catastrophique, nous ne pensons pas que les facteurs de limitations évoqués ci-dessus se manifestent dans les prochaines décennies. En particulier, un plafonnement des effectifs humains à la suite de famines, comme le prédisait Malthus, ou toute calamité de ce genre paraissent peu vraisemblables, même pour le début du XXI^{e} siècle. De même, l'éventualité de troubles neuroendocrinologiques mortels ou affectant la fécondité, comme on les observe dans les populations de rongeurs de trop forte

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

densité, est peu probable d'après les données physiologiques dont on dispose actuellement pour l'espèce humaine et ne peut être envisagée dans son cas.

Comme l'écrivait en 1971, R. Dubos, *"l'homme n'est pas sur le chemin de l'extinction, il peut s'adapter à la plupart des conditions de milieu et c'est en cela que réside la vraie tragédie. Comme nous nous adaptons, nous acceptons des conditions de plus en plus mauvaises sans réaliser qu'un enfant né et élevé dans un tel environnement n'a aucune chance de développer pleinement ses capacités physiques ou mentales. Il est essentiel que nous nous attaquions à ces problèmes en tant que Sociétés et Nations, non pas parce que nous sommes menacés d'extinction, mais parce que si nous ne comprenons pas l'action exercée par l'environnement sur notre organisme, quelque chose de pire que l'extinction de l'espèce humaine pourrait bien survenir — une dégradation progressive de la qualité de la vie".*

Comment ne pas craindre que le monde ne devienne en quelques décennies une immense banlieue pavillonnaire et industrielle, voire un gigantesque bidonville ? Lorsque l'on prend en considération l'explosion démographique, l'accélération de la production des déchets et de la destruction des forêts, l'anéantissement de la nature pourrait paraître inéluctable s'il n'est pas mis au plus vite un terme à la dégradation de la biosphère par l'espèce humaine.

Celle-ci atteint de nos jours une telle ampleur que certains ont pu assimiler la période actuelle à un nouvel étage géologique que l'on pourrait dénommer par dérision le "Poubellien supérieur", les cimetières d'automobiles, les décharges sauvages dans les forêts suburbaines, les amas de détritus, bouteilles plastiques et autres résidus de la "Société de consommation" préfigurent le cadre de vie des générations futures.

Si l'on réfléchit quelque peu aux effets psychosomatiques provoqués par les conditions de milieu caractéristiques de l'environnement urbain actuel, les préoccupations du Professeur Dubos paraissent sans aucun doute justifiées.

Etude démoécologique des problèmes de surpeuplement

RAPPEL DES NOTIONS ELEMENTAIRES DE DYNAMIQUE DES POPULATIONS

Une population peut se définir comme un groupe d'organismes de même espèce, occupant un territoire déterminé et qui possède ses caractères propres auxquels on peut donner une expression statistique. Ces derniers sont spécifiques du groupe et non de l'individu pris isolément. Ce sont par exemple la densité, la natalité, la mortalité, le potentiel biotique, la dispersion et la courbe de croissance.

Il existe dans chaque écosystème un ensemble de facteurs écologiques extrinsèques et intrinsèques, qui ajustent les effectifs

BUNSI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

des populations de chaque espèce à une valeur moyenne correspondant à la capacité limite du milieu et compatible avec les possibilités de celui-ci.

Par ailleurs, si l'on place une population dans un milieu stable, duquel on a éliminé artificiellement tout facteur limitant, ses effectifs vont accroître indéfiniment selon une loi exponentielle en fonction du temps.

Les facteurs démoécologiques qui conditionnent la croissance d'une population agissent sur deux paramètres d'effet opposé, le coefficient de natalité b et le coefficient de mortalité m. Si l'on ne tient pas compte des migrations (d'ailleurs actuellement négligeables dans le cas de l'espèce humaine), on pourra caractériser chaque population par son coefficient intrinsèque d'accroissement naturel $r = b - m$.

La théorie et l'expérience nous enseignent que si l'on place une population d'espèce animale ou végétale dans un milieu aux possibilités illimitées, —levures dans une grande quantité de solution nutritive ou insectes mis en présence d'un large excès d'aliments par exemple,— celle-ci s'accroîtra selon une loi exponentielle.

Soient No et N les effectifs d'une population aux temps t_o et t. On peut définir un taux d'accroissement naturel de la population R.

Ce dernier exprime le rapport entre le nombre d'individus dont s'est accru la population dans l'Unité de temps et la valeur initiale des effectifs.

Nous aurons

$$R = \frac{\Delta N}{N \Delta t} \quad (1)$$

Si l'on prend comme exemple le cas de l'espèce humaine, on note qu'elle comptait $3{,}889 \times 10^9$ personnes au milieu de l'année 1974 et $3{,}967 \times 10^9$ personnes au milieu de 1975.

Dans ce cas précis $t = 1$ an $\quad N = 3{,}967.10^9 - 3{,}889.10^9 = 77{,}3 \times 10^6$ d'où $R = \dfrac{77{,}3 \times 10^6}{3{,}967 \times 10^9 \times 1} = 0{,}0195$ individu/personne/an.

L'accroissement annuel des effectifs est donc de l'ordre de 1,95 %/an, il est assez remarquablement constant depuis plusieurs décennies. De même, dans le cas des populations d'autres espèces élevées en l'absence de facteurs limitants on remarque une augmentation incessante de la population avec un taux constant d'accroissement par unité de temps.

Quant $t \to 0$ dans l'expression (1)

R tend vers une limite r appelée taux intrinsèque d'accroissement naturel, constante caractéristique de l'espèce considérée.

$$r = \frac{dN}{N\,dt} \quad (2) \qquad \text{soit} \qquad dN = r\,N\,dt \quad (3)$$

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Si nous intégrons cette expression, nous obtenons $N = No\, e^{rt}$ (4). Les effectifs varient donc de façon exponentielle en fonction du temps prenons $No = 1$ et $t = 1$ an, soit R le taux d'accroissement annuel, au bout d'un an l'effectif sera $N = 1 + R$ d'où $1 + R = e^r$ (5) et $r = \text{Log}\,(1 + R)$ (6).

Pour les faibles taux d'accroissement, inférieurs — disons — à 5 %/an, l'expression (6) permet de vérifier que l'on peut prendre $r \neq R$.

Par ailleurs, la vitesse d'accroissement des effectifs, dans une population se développant en l'absence de facteurs limitants a pour expression $\frac{d\,N}{d\,t} = r\,N = r\,No\,e^{rt}$ (7). Cette vitesse croît donc elle-même de façon exponentielle en fonction du temps !

Si l'on trace la courbe représentative de la fonction (1) on obtient une courbe en J dénommée aussi courbe du *potentiel biotique* (Fig. 2,9). Celle-ci traduit l'expression de la fécondité maximale de l'espèce, laquelle ne peut se manifester qu'en l'absence de facteurs limitants.

Tel semble être le cas de l'espèce humaine, dont l'évolution des effectifs en fonction du temps est de forme exponentielle ainsi qu'en atteste la figure 2,8, - tout au moins jusqu'à l'époque actuelle.

A cette notable exception près, l'expérience montre qu'aucune autre espèce vivante ne suit cette loi d'accroissement. Cela apparaîtra encore plus nettement si l'on prend en considération la valeur du coefficient r pour les autres espèces animales. Celui-ci est de 2,25 par individu et par an chez le campagnol, 2,7 chez le surmulot et 19,8 chez *Calandra oryzae*, un insecte inféodé aux céréales entreposées.

Déjà dans le cas de l'espèce humaine, dont le taux d'accroissement naturel (2,35 %par an) est particulièrement bas, le temps de doublement des effectifs était de 29,4 ans dans la première moitié du XX^e siècle. On trouve 10 jours pour celui de *Calandra oryzae*.

Chez la mouche domestique dont le taux intrinsèque d'accroissement naturel est de 120 descendants par femelle et par génération, on peut montrer, compte tenu du fait qu'il existe en moyenne sept générations par an, qu'un seul couple peut donner en une année 6182 milliards d'individus (1). Comme le poids moyen d'une mouche adulte est de 20 mg, cela représenterait une biomasse de 123000 t d'insectes descendant d'un seul couple initial de géniteurs !.

Darwin avait déjà montré que même l'éléphant, animal pourtant peu fécond, pourrait en 750 ans envahir la terre entière puisque théoriquement un seul couple produirait 19 millions de descendants en ce laps de temps.

Tous ces exemples démontrent par l'absurde qu'aucune espèce animale ou végétale ne voit ses populations croître selon une loi exponentielle dans la nature. Il existe par conséquent des facteurs limitants qui ajustent les effectifs de chaque espèce aux alentours d'une valeur optimale compatible avec la pérennité de son habitat.

(1) En supposant que le *sex ratio* soit normal $\left(\frac{\sigma}{\varphi} = 1\right)$ et que chaque femelle se reproduit à chaque génération au cours d'une année.

CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'expérience montre que le milieu oppose une résistance d'autant plus grande à l'accroissement d'une population que ses effectifs sont plus élevés. Le tableau ci-dessous rapporte les résultats de l'étude d'une population de *Saccharomyces cerevisiae* cultivés dans un milieu non renouvelé.

Tableau XIV – Croissance de la levure *Saccharomyces cerevisiae* en culture (d'après Pearl, 1925, *in* Kormondy, 1970).

Temps t (en heures)	*Nombre d'individus N (par cm³ de milieu)*	*Vitesse d'accroissement*
0	9,6	0
2	29,0	19,4
4	71,1	42,1
6	174,6	103,5
8	350,7	176,1
10	513,3	162,6
12	594,1	81,1
14	640,8	46,4
16	655,9	15,1
18	661,8	5,9

La courbe de croissance de la population, construite à partir de ces données numériques, présente une forme de S ; c'est une sigmoïde qui tend vers une valeur limite asymptotique. Celle-ci n'est autre que l'effectif maximum que peut supporter le milieu considéré, encore dénommée capacité biologique spécifique, K (Fig. 2.9).

A la différence des courbes de croissance théoriques, on constate ici que la vitesse d'augmentation des effectifs $\frac{dN}{dt}$ ne croît pas sans cesse mais atteint un maximum au-delà duquel elle tend vers zéro.

Dans de telles conditions, on peut démontrer que les effectifs numériques N varient en fonction du temps selon l'expression :

$$N = \frac{K}{1 + e^{a - rt}} \quad \text{où} \quad a = \frac{r}{K} \qquad (5)$$

On voit que lorsque le temps augmente, $N \rightarrow K$.

La courbe représentative de cette fonction est dénommée *courbe logistique* (Fig. 2,9). On remarque que l'espace compris entre la courbe de potentiel biotique (J) et la courbe logistique (S) exprime la résistance du milieu à l'accroissement de population.

On peut définir un coefficient de résistance du milieu R_m qui freine d'autant plus la croissance de la population que celle-ci est plus importante.

$$R_m = 1 - \frac{K - N}{K} \qquad (6)$$

Si l'on dérive l'expression (5), on trouve que la vitesse d'accroissement des effectifs est de la forme :

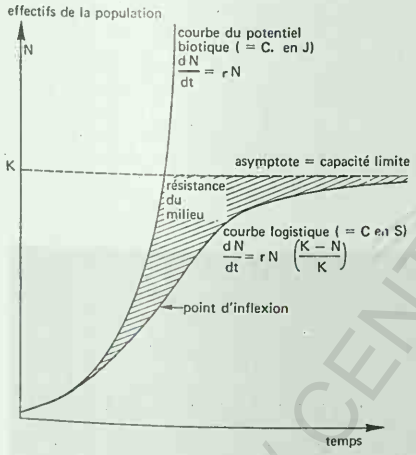


Figure 2.9
Courbes de croissance théorique d'une population en l'absence ou en présence de facteurs limitants (explications dans le texte)

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(\frac{K-N}{K}\right) \qquad (7)$$

$$\frac{dN}{dt} \to 0 \qquad \text{quand } N \to K \text{ tandis que } R_m \to 1.$$

Il est intéressant de noter que Verhulst, qui établit en 1838 la théorie de la courbe logistique, essayait de montrer que la loi de croissance de l'espèce humaine était de cette forme. De même Pearl et Reed (1900) qui reprirent sans s'en douter les idées de ce précédent auteur, essayèrent de faire correspondre les données des recensements de la population américaine à une formule logistique et de prévoir ainsi la date à laquelle les Etats-Unis seraient peuplés par 200 millions d'habitants.

Leur tentative échoua, ce chiffre fut atteint en 1967, quelque cent ans en avance sur leurs prévisions !

Dans la nature et à l'exception de l'espèce humaine, les facteurs de limitation des populations interviennent de façon efficace. Certains d'entre eux, abiotiques, se rapportent aux conditions climatiques : température et hygrométrie déterminent par exemple le nombre d'habitats disponibles en milieu continental. Ils agissent aussi de façon indirecte sur l'alimentation, laquelle constitue un facteur limitant essentiel dans la régulation des effectifs d'une population. Enfin, interviennent aussi des facteurs biotiques tels que prédation, parasitisme, maladie etc.

En réalité, les effectifs de chaque espèce ne sont jamais stables mais fluctuent (Fig. 2.10) autour d'une valeur moyenne théorique (la capacité biologique spécifique du milieu, K). Nous sommes donc en présence d'un équilibre dynamique conditionné (entre autres facteurs) par les compétitions intra et interspecifiques. Ces facteurs extrinsèques d'accroissement des populations agissent surtout sur le coefficient de mortalité, m alors que les facteurs intrinsèques influent sur la natalité b.

Ce dernier coefficient conditionne les possibilités démographiques de chaque espèce puisque $r = b - m$.

Le coefficient de natalité b est un caractère propre à chaque espèce animale. Il est essentiellement contrôlé par des facteurs endogènes, génétiques, liés à la souche ou à la race géographique. Certes, des facteurs exogènes, comme les conditions climatiques, l'alimentation et dans certains cas le parasitisme, peuvent interférer avec la fécondité ; mais, de façon générale, celle-ci varie dans d'étroites limites et se situe toujours à un niveau proche de l'optimum théorique pour l'espèce considérée.

A l'opposé, le taux de mortalité subit d'importantes fluctuations selon les conditions de milieu, et intervient de façon déterminante dans l'ajustement des effectifs des populations naturelles de chaque espèce aux possibilités de l'environnement.

La bonne compréhension de la structure démographique d'une population implique nécessairement la connaissance du taux de

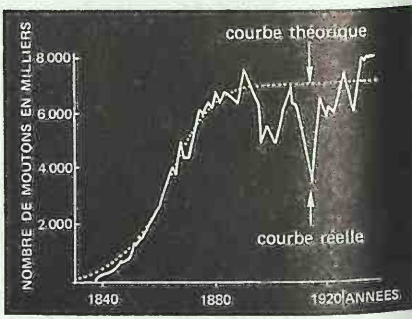


Figure 2.10
Courbe de croissance des effectifs du chepte ovin après l'introduction du mouton dans l'Il de Tasmanie. En trait continu est figurée l variation observée du peuplement, en pointill le graphe théorique (courbe logistique) su lequel s'ajustent les données expérimentales D'après Davidson in *Dajoz 1971*

ROYAL GEOGRAPHICAL UNIVERSITY LIBRARY

mortalité dans les diverses classes d'âge et de son image négative, constituée par l'espérance de vie des individus qui la composent.

Les tables de survie rendent compte de façon précise de la mortalité naturelle dans une espèce déterminée. Il importe à cet égard de distinguer l'espérance moyenne de vie pour les individus de chaque sexe, — ou encore *longévité moyenne*, — et la *longévité potentielle*. Celle-ci correspond à la durée de vie maximum atteinte par quelques individus. Ainsi en Europe, la longévité moyenne est de 68,5 ans chez l'homme et 73,2 ans chez la femme, alors que les longévités potentielles sont respectivement de 108 et 109 ans [le record pour l'espèce humaine (126 ans) aurait été atteint par un montagnard du Caucase !].

Les tables de survie se dressent en dénombrant, à intervalle de temps constant, les survivants d'une population initiale de 1000 individus. Dans le cas de la Mouche domestique par exemple, nous avons relevé les données statistiques suivantes :

Tableau XV — Tables de survie de la mouche domestique *Musca domestica L.* (d'après Ramade F., 1967).

Age (en jours)	*Nombre de survivants*		*% par rapport à la longévité potentielle*	
	♂	♀	♂	♀
0	1 000	1 000	0	0
8	984	963	18,6	14,5
14	950	904	32,6	25,5
20	712	763	46,5	36,4
26	201	519	60,5	47,3
32	46	388	74.4	58,2
38	6	173	88,4	69,1
44	0	82	100	80,0
50		22		90,9
56		0		100

La longévité moyenne est donc de 22 jours chez le mâle et de 28 jours chez la femelle ; la longévité potentielle de 43 jours chez le mâle et de 55 jours chez la femelle.

On constate qu'il existe toujours une différence significative entre les sexes : la longévité des femelles est en effet nettement supérieure à celle des mâles dans la plupart des espèces.

La courbe de survie fournit une bonne représentation de la mortalité naturelle dans chaque population. Elle s'obtient à partir des tables correspondantes. Afin de permettre la comparaison entre espèces différentes, on ne tient pas compte de la valeur absolue des classes d'âge. On calcule le pourcentage de chacune d'elle par rapport à la longévité potentielle. Ainsi dans le tableau XV, nous voyons que 519 femelles sur 1000 étaient encore vivantes à l'âge de 26 jours. Comme la longévité potentielle est de 55 jours chez la mouche domestique dans les conditions de l'expérience, cela correspond à $26/55 \times 100 = 47{,}3\,\%$ de la longévité potentielle pour la classe d'âge en question.

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

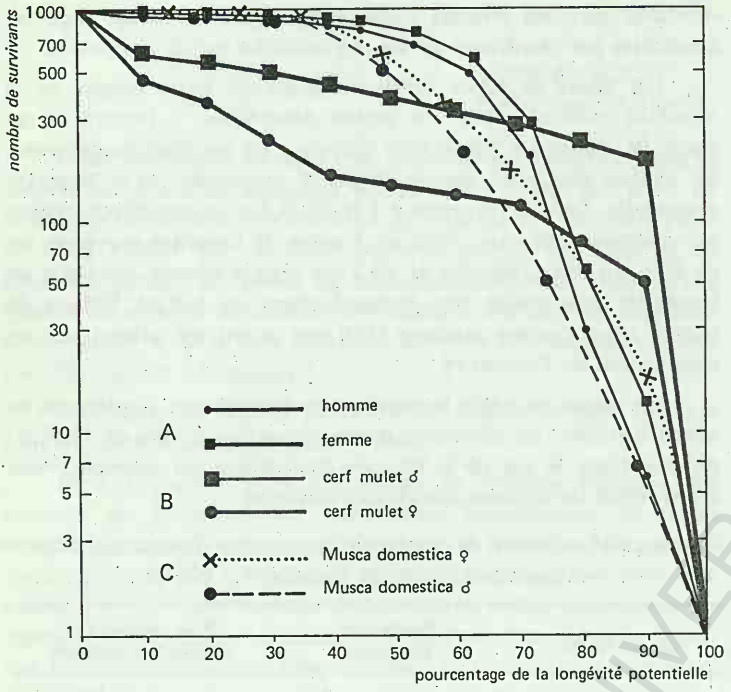


Figure 2.11
Courbes de survie des deux sexes dans l'espèce humaine (A), chez le cervidé Odocoileus hemionus *(B) et chez* Musca domestica *(C). Dans chaque cas s'observe une moindre longévité des mâles. A, d'après Dublin et coll. (1949), B, d'après Taber et Dasman (1957)* in *Kormondy, 1969 ; C, d'après Ramade (1967)*

La figure 2.11 représente les données précédentes, ainsi que celles relatives à l'espèce humaine. Un ensemble de remarques s'imposent. Tout d'abord, il existe en général un net écart entre les deux sexes, la longévité moyenne des femelles est supérieure à celle des mâles. Dans l'espèce humaine, un ensemble de facteurs socio-économiques accentue ce phénomène (guerres, conditions de travail, mode de vie etc. qui favorisent la mortalité masculine). Par ailleurs, les espèces animales présentent trois types de courbes de survie. Chez l'homme par exemple, la mortalité, faible pendant au moins la première moitié de la durée de vie potentielle, croît ensuite subitement. On observe quelque chose de semblable pour la mouche domestique et de nombreux autres insectes. Dans une seconde catégorie d'organismes, le taux de mortalité reste constant quelle que soit la classe d'âge considérée. Les hydres, certains oiseaux (mouettes) sont dans ce cas, Enfin, un troisième groupe d'espèces présente un fort taux de mortalité chez les jeunes individus, puis ce dernier s'atténue pour croître à nouveau chez les individus âgés. Ainsi chez le cervidé *Odocoileus virginicus* ou le rouge-gorge *(Erithacus rubecula)* les trois quarts de la population initiale périssent avant que les individus n'aient atteint le dixième de la durée de vie potentielle.

UNIVERSITY OF CENTRAL ASIA LIBRARY

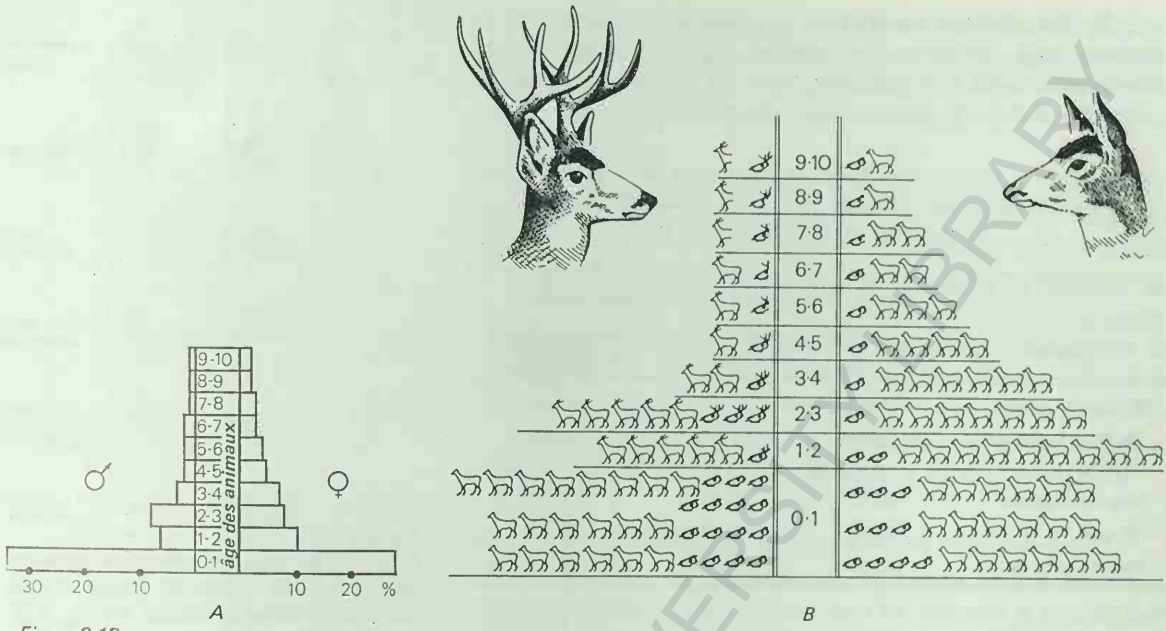


Figure 2.12
Pyramide des âges du cerf mulet (Odocoileus Hemionus)
A — Figuration classique (in *Dajoz*) ; *B — figuration plus complète avec la proportion de morts dans chaque classe d'âge symbolisée par une silhouette de crâne* (in *Smith*). *D'après Taber et Dasman, Calif. Fish. Game bull. n° 8 1958*

Certains auteurs ont suggéré que les courbes de survie seraient de ce type dans les populations humaines primitives où la mortalité infantile est très élevée.

Les pyramides des âges permettent d'obtenir une représentation intéressante de la structure en classes d'âges d'une population, Celles-ci s'obtiennent par superposition de rectangles de hauteur constante et de surface proportionnelle aux effectifs de chaque classe d'âge. Les mâles et les femelles sont disposés en deux groupes situés de part et d'autre d'une médiane (Fig. 2.12).

On peut aussi donner d'une pyramide des âges une représentation simplifiée en distinguant trois groupes d'âges dans les effectifs d'une population : celui des individus jeunes dans la période pré-reproductive, celui des adultes (période reproductive) et celui des individus âgés qui ne sont plus féconds (période post-reproductive). Selon que la population sera en expansion, stable ou déclinante, l'aspect de la pyramide des âges diffèrera beaucoup (Fig. 2.13).

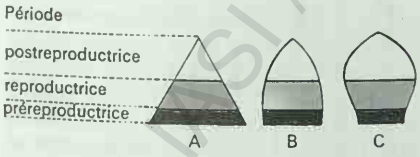


Figure 2.13
Structure d'âge de divers types de population
A — en expansion ; B — stable ; C — déclinante. D'après Bodenheimer in *Kormondy, 1969, p. 81*

Une population en expansion rapide présentera une pyramide des âges à large base, avec un sommet très étroit. Dans une population stable, le nombre d'individus sera identique dans chaque classe d'âge d'où l'aspect en "cloche" du diagramme. Enfin, dans une population déclinante, la "pyramide" des âges aura un aspect en champignon, avec un faible nombre de jeunes et une prépondérance numérique des individus âgés.

BDU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Si l'on applique ces données aux populations humaines, on constate qu'à l'exception de quelques pays d'Europe, dont la démographie tend à se stabiliser, tous les autres présentent des pyramides démographiques au profil très accentué.

Tableau XVI — Structure d'âge de la population dans les principales régions du globe. (d'après Pop. Bull. n° 4, vol. 21, 1965, Population Reference Bureau ed.)

Régions	*Classes d'âge (proportion/population totale)*		
	Pré-reproductive (0 à 19 ans)	*Reproductive (20 à 49 ans)*	*Post-reproductive plus de 50 ans*
Europe	25 %	40 %	35 %
URSS et Amérique du Nord	32 %	48 %	20 %
Asie méridionale	40 %	45 %	15 %
Afrique	42 %	46 %	12 %
Amérique latine	42 %	40 %	18 %

Figure 2.14
Pyramide des âges des populations humaines dans les grandes régions du monde. D'après Population Reference Bureau vol. 21, n° 4, octobre 1965

IUAV BIBLIOTECA CENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

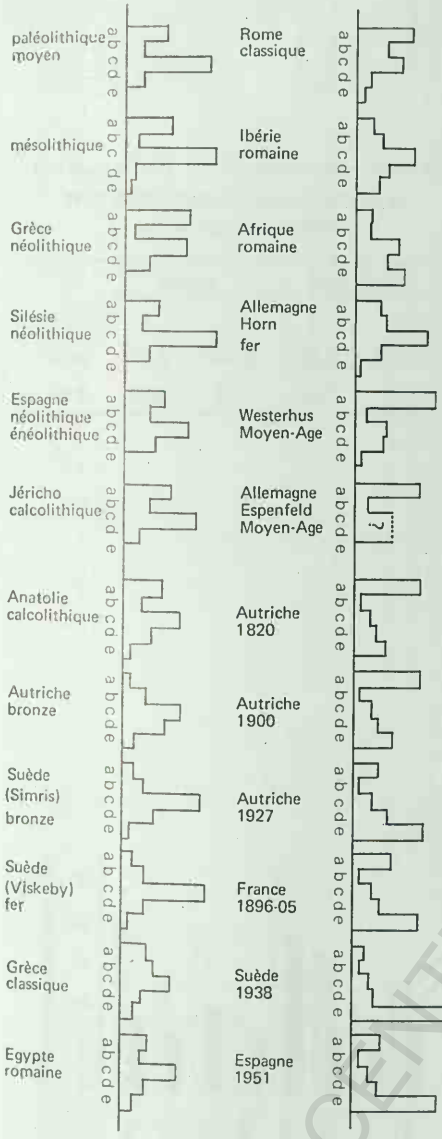


Figure 2.15
Histogrammes de fréquence de la mortalité dans l'espèce humaine depuis la Préhistoire jusqu'à nos jours. Les populations sont réparties en 5 classes d'âge : a, de 0 à 12 ans ; b, de 13 à 20 ans ; c, de 21 à 40 ; d, de 41 à 60 ; e, au-dessus de 60. Remarquer la tendance progressive à l'augmentation des classes d et e, quasi inexistantes dans les temps antiques et la récente diminution de la mortalité infantile. D'après Kurth "Die bevolkerunggeschichte des Menschen", Helb. Biologie, IX, 1965, 2°, p. 461

Les données du tableau XVI montrent que dans les pays où sévit la crise démographique, les classes d'âge inférieures à 20 ans représentent plus de 40 % du total de la population alors qu'elles ne correspondent tout au plus qu'à 25 % des effectifs en Europe à l'heure actuelle.

Un des caractères essentiels de la structure d'âge d'une population réside en la proportion d'individus économiquement actifs, et de ceux qui en dépendent par rapport à l'effectif global.

Si l'on considère que la classe d'âge capable de travailler est comprise entre 15 et 64 ans, le nombre d'individus actifs paraît, toutes proportions gardées, beaucoup plus faible dans les pays du Tiers-Monde par rapport aux nations industrialisées, par suite de la prédominance écrasante des enfants et des adolescents (Fig. 2.14).

Ainsi, aux Indes, 43 % des individus sont improductifs et 57 % en âge de travailler, contre 35 et 65 % en Grande-Bretagne.

CAUSES DEMOECOLOGIQUES DE LA SURPOPULATION HUMAINE

L'explosion démographique du XX^{e} siècle résulte avant tout d'une spectaculaire diminution du taux de mortalité, à tous les âges de la vie, alors que le coefficient de natalité est resté le même, tout au moins dans les pays sous-développés, ou n'a pas baissé dans des proportions comparables. Dans ces conditions, si m décroît, r augmente, puisque $r = b - m$.

Cette augmentation considérable de l'espérance moyenne de vie résulte de causes multiples. Les progrès de la médecine : vaccination systématique des populations, usage des antibiotiques, des chimiothérapies les plus variées, l'amélioration du milieu de vie urbain (hygiène publique, salubrité), enfin les progrès des techniques agronomiques, lesquels ont permis de réduire les risques de famines, constituent autant de facteurs ayant contribué à cette réduction drastique du coefficient de mortalité.

Les recherches effectuées sur le taux de mortalité aux différents âges, à diverses époques de l'histoire, montrent un progrès incessant de la longévité dans l'espèce humaine.

L'espérance moyenne de vie, qui était de 18 ans à peine au Néolithique chalcolithique, s'élevait à 25 ans à l'apogée de l'empire romain. On l'évalue à 30 ans au Moyen-Age (en Grande-Bretagne), à 35 ans en 1790 (dans l'état du Massachusets), à 50 ans en 1900 sur la côte Est des Etats-Unis, enfin à 73 ans en 1955 (Hollande).

Encore plus instructive est l'étude des histogrammes de fréquence du taux de mortalité dans les diverses classes d'âges (Fig. 2,15). On constate, depuis les temps préhistoriques jusqu'à nos jours, une modification considérable dans la distribution du taux de mortalité en fonction de l'âge.

Au Paléolithique, la majorité des individus périssaient entre 20 et 40 ans. On ne trouve, en particulier, pratiquement aucun squelette de femme âgée de plus de 40 ans dans les stations

DUBOIS / CENTRE UNIVERSITAIRE

fouillées. Cela provient sans doute des risques inhérents à l'accouchement dans l'espèce humaine, en des temps où le taux de natalité était proche (sinon égal) du maximum physiologique de l'espèce (potentiel biotique). La classe *e* (individus d'âge supérieur à 60 ans) est inexistante pendant toute cette période.

Cette dernière apparaît au Néolithique supérieur (âge des métaux). Jusqu'à la fin du Moyen Age, la structure d'âges des populations humaines est restée comparable à ce qu'elle était aux époques protohistoriques. Cependant on remarque un accroissement du taux de mortalité infantile pendant la période médiévale, lié sans doute à l'apparition de famines, lesquelles étaient fort rares pendant l'antiquité, par suite des faibles densités des peuplements humains.

A partir du début des temps modernes, on constate une tendance à l'augmentation de l'espérance moyenne de vie. Cependant, la mortalité infantile reste très élevée jusqu'au milieu du XIX^{e} siècle. Celle-ci a subi une réduction drastique avec l'avènement de l'ère pastorienne qui a permis une hausse considérable de la longévité moyenne. Cela apparaît nettement sur la figure 2.15 où l'on voit qu'en Suède, le taux de mortalité était très réduit en 1938 dans les classes d'âge antérieures à 60 ans, la majorité des individus vivant au-delà.

Les causes de cette augmentation considérable de l'espérance de vie résident avant tout dans les progrès de la biologie et de la médecine au cours du dernier siècle.

Tableau XVII — Evolution de la mortalité par tuberculose et pneumonie en Italie et aux Etats-Unis (*in* Marcuzzi, 1968)

Année	*Mortalité pour 100 000*			*Découverte thérapeutique*
	Tuberculose		*Pneumonie*	
	Etats Unis	*Italie*	*Etats Unis*	
1921	100	140		
1930	75	120	65	
1935	57	95	55	Sulfamides
1940	45	90	28	Pénicilline
1945	38	100	20	
1950	23	45	10	Auréomycine + Terramycine

Le tableau XVII illustre, à titre d'exemple, la diminution de la mortalité par tuberculose et pneumonie dans deux pays occidentaux, au cours de la première moitié de ce siècle. Il existe une association remarquable entre cette réduction et les progrès successifs de la thérapeutique.

L'espérance moyenne de vie, qui était de 33 ans au moment où débarquèrent en Amérique du Nord les émigrants du *Mayflower* s'élevait à 70 ans en 1965 aux Etats-Unis. De 1900 à 1970, le taux de mortalité est passé de 17,2 à 9,4 ‰ dans ce même pays.

CONCORDIA UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XVIII – Variation du taux de mortalité infantile aux Etats-Unis entre 1900 et 1905

	Blancs		*Non blancs*	
	♂	♀	♂	♀
1900	175,9	142,6	369,3	299,5
1965	23,9	18,1	43,1	36,6

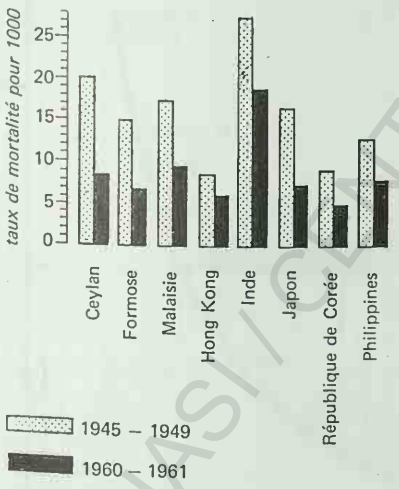


Figure 2.16
Variation du taux de mortalité entre 1945-9 et 1960-1 dans quelques pays du tiers-monde. D'après Population bulletin in Ehrlich 1970 "Population, Resources, Environnement" Freeman ed. 1970

Mais, plus encore que l'allongement de la durée moyenne de la vie humaine, c'est la diminution du taux de mortalité infantile qui est la cause de l'explosion démographique contemporaine.

Aujourd'hui, plus de la moitié des hommes vivants sont nés après 1945 et si cette proportion n'est pas plus élevée, cela provient d'une importante réduction du taux de mortalité chez l'adulte. Cette réduction a été fort considérable depuis le début du siècle. Aux Etats-Unis, par exemple, on observe l'évolution indiquée au tableau XVIII.

Dans les pays industrialisés, le taux de mortalité infantile est aujourd'hui des plus faibles. En 1965, il s'élevait à 23‰ en France, 19‰ en Grande Bretagne, 17‰ au Japon et 11‰ en Suède.

La baisse générale du taux de mortalité s'est aussi produite dans les pays du tiers-monde, la figure 2.16 représente la diminution de ce taux entre 1945 et 1960 dans divers pays d'Asie. Mais, alors que cette réduction s'est accompagnée d'une diminution équivalente du taux de natalité dans les pays industrialisés, ce dernier est resté au même niveau dans les autres populations humaines. Le tableau XIX figure, à titre d'exemple, la variation comparative de ces taux en Grande-Bretagne et à Ceylan au cours des derniers siècles.

Tableau XIX

	Indice pour 1 000 personnes			
Date	*Grande Bretagne*		*Ceylan*	
	b	*m*	*b*	*m*
1750	38	27	–	–
1900	27	16	–	–
1910	25	14	38	32
1920	20	13	41	32
1940	17	12	37	20
1950	18	10	40	12

Ces données mettent en évidence la cause essentielle de l'explosion démographique dans le tiers-monde. Alors que la réduction de natalité s'est effectuée de façon progressive en Europe depuis 150 ans, tandis que la longévité croissait, celle-ci ne s'est pas encore amorcée dans les pays sous-développés, alors que le taux de mortalité s'y est réduit de façon spectaculaire (fig. 2.17).

Ainsi, à Ceylan, le taux de natalité est aujourd'hui comparable, sinon supérieur, à ce qu'il était au début du siècle, alors que le taux de mortalité a décru de trois fois au cours de la même période, On retrouve ce phénomène dans tous les pays du tiers-Monde : au Mexique, dont le taux de croissance démographique en 1970 était de 3,4% par an (Ceylan 2,4 % !) le taux de mortalité à baissé de 30 à 10 ‰ en 30 ans, alors que l'indice de natalité n'a pas varié pendant ce même laps de temps, demeurant aux alentours de 45 ‰.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

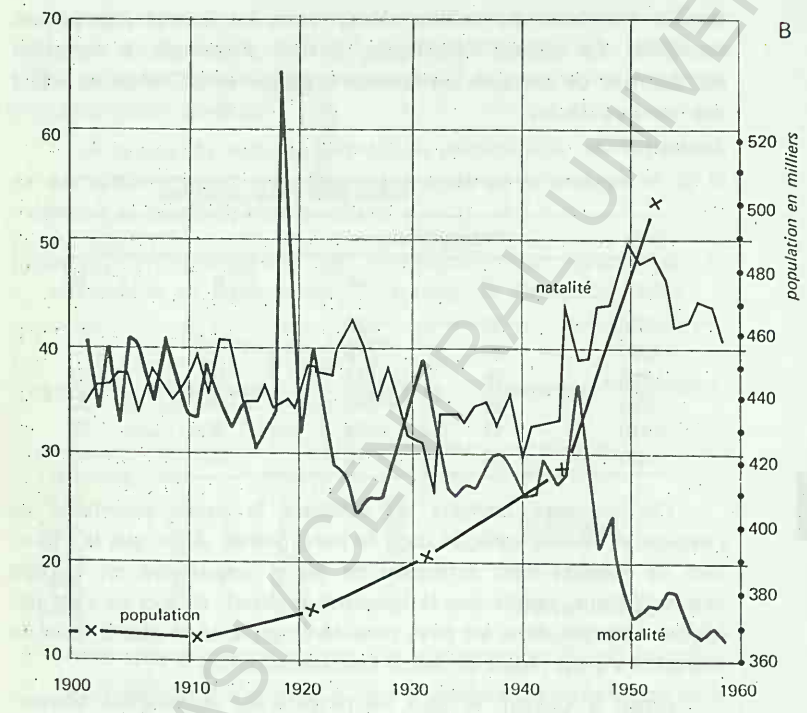


Figure 2.17
Variation des taux de natalité et de mortalité. A, en Grande-Bretagne entre 1750 et 1950; B, à l'Ile Maurice entre 1900 et 1960. D'après divers auteurs in *Hutchinson, 1969*

La forte proportion d'individus en période pré-reproductive dans les pays où sévit l'inflation démographique, porte en elle une fantastique potentialité d'expansion de la population. En effet, la dimension de la classe d'âge capable de se reproduire va augmenter dans les années à venir avec pour conséquence un gonflement des effectifs des classes pré-reproductives.

ROUMASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Cela signifie que, même dans l'hypothèse d'une mise en œuvre immédiate d'un plan de limitation des naissances efficace pour l'ensemble de la population mondiale, quelque trente années devront s'écouler avant que l'on enregistre un ralentissement significatif de sa croissance démographique.

On peut donc conclure qu'à l'exception des pays européens et, dans une moindre mesure des Etats-Unis et de l'Union soviétique, il n'y a pas eu de transition démographique dans l'ensemble de l'humanité : la baisse du taux de mortalité n'a pas été compensée par celle du taux de natalité.

L'ensemble du tiers-monde se conforme aujourd'hui encore aux lois démoécologiques valables pour toute espèce vivante ; en l'absence d'un contrôle volontaire et librement décidé de la natalité, sa population évolue dans le temps selon une courbe en J qui exprime le potentiel biotique de l'espèce humaine.

Prospectives démographiques : catastrophe ou stabilisation ?

Ces considérations nous conduisent à traiter de l'évolution future des effectifs de l'humanité et des prospectives démographiques pour l'an 2000 voire pour le XXI[e] siècle.

En ce domaine, les experts eux-mêmes sont partagés et deux thèses s'affrontent. L'une, pessimiste, considère que l'ensemble des populations humaines va continuer à s'accroître selon une loi exponentielle. L'autre, optimiste, soutient que nous entrons dans une phase de transition démographique. En effet, l'exemple de l'Europe, où cette dernière s'est amorcée il y a plus d'un siècle, montre que l'explosion des effectifs n'est pas un phénomène inéluctable. Il est parfaitement possible d'y mettre un terme dans la mesure où disparaît l'analphabétisme et où s'élève le niveau d'éducation sanitaire des populations. L'Allemagne, l'Autriche, la Suède possèdent aujourd'hui un très faible taux d'accroissement, de l'ordre de 0,4 % seulement, soit un temps de doublement de 175 ans (Fig. 2.18) considéré encore dans ces pays comme trop élevé.

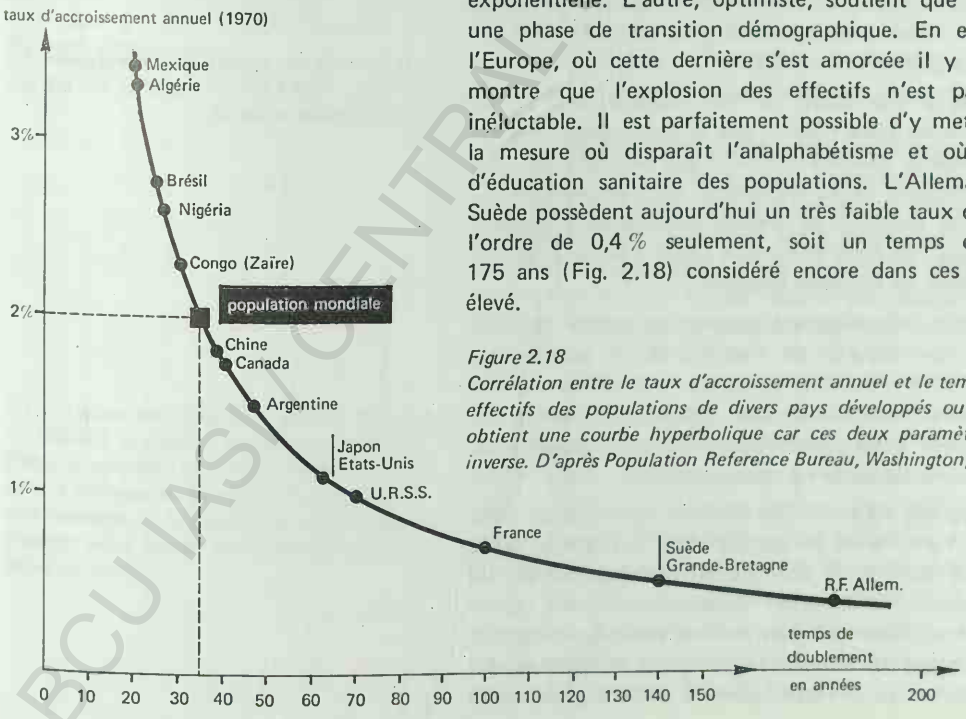


Figure 2.18
Corrélation entre le taux d'accroissement annuel et le temps de doublement des effectifs des populations de divers pays développés ou du tiers-monde. On obtient une courbe hyperbolique car ces deux paramètres varient en raison inverse. D'après Population Reference Bureau, Washington, août 1971

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Ehrlich (1970,1971) a systématisé dans ses publications les conceptions pessimistes ici évoquées, ce qui lui a valu aux Etats-Unis le surnom de "M. Catastrophe". Ses vues semblent confirmées par le récent ouvrage de Denis Meadows *"The limits to growth"*. Celui-ci expose les résultats d'une étude qu'avait demandée le Club de Rome au M.I.T. de Boston sur les limites de la croissance. Ses conclusions particulièrement sombres sur l'avenir de l'humanité au cours du prochain siècle ont soulevé une tempête dans la plupart des milieux politiques, économiques et industriels de l'Occident. Il n'est pas dans notre intention, et encore moins dans nos capacités, d'analyser ici les méthodes cybernétiques utilisées par l'équipe du M.I.T. pour mener à bien leur étude.

Rappelons cependant que le modèle de Forrester, employé par Meadows et ses collaborateurs, repose sur l'analyse d'un système comportant cinq paramètres principaux : la population, l'industrialisation, la pollution, la production alimentaire et l'épuisement des ressources naturelles. Par ailleurs, ce modèle procède d'un axiome selon lequel chacun de ces paramètres, qui sont interdépendants, croît selon une loi exponentielle en fonction du temps.

Cette étude suppose donc qu'aucune transition démographique n'interviendra dans le futur pour le tiers-monde et que la tendance à la stabilisation des effectifs, très nette dans les pays industrialisés, ne progresserait plus.

Dans de telles conditions, le calcul montre que l'humanité comptera 7,5 milliards de personnes en l'an 2000 et 14 en 2030 (au minimum). Il est d'ailleurs facile de vérifier que le maintien à 35 ans du temps de doublement des effectifs au cours du XXI^{e} siècle les ferait passer à 28 milliards en 2070 ([1]).

L'extrapolation à l'an 3000, si l'on suppose une loi de croissance exponentielle, nous montre que la terre comptera alors un milliard de milliards d'habitants soit 1 400 individus par m^2. Selon toute vraisemblance, cette éventualité est peu probable . . . on doit bien convenir qu'une crise majeure surviendrait longtemps avant, si tant est que l'on accorde quelque crédit à la technique de simulation des modèles de Forrester-Meadows . . .

Dans les données technologiques actuelles et compte tenu des limites prévisibles aux progrès de l'agronomie, il semble que l'effectif de 10 milliards d'hommes constitue le maximum admissible pour l'écosphère. Mais il faut bien ajouter que l'on ignore tout des conséquences à long terme des méthodes actuelles de production intensive en agriculture pour sa stabilité.

D'autres écologistes adoptent une attitude optimiste au sujet de la démographie humaine et se placent dans l'hypothèse où la population mondiale croît selon une courbe logistique. Certes, les prévisions sont toujours aléatoires en ce domaine. Il n'est cependant pas absurde de supposer que nous sommes actuellement placés dans la région de la courbe proche de son point d'inflexion. En effet, ceci est conforme au fait que la vitesse d'accroissement des

(1) Il suffit de prendre dans l'expression (1), $p.115\,N_0 = 3{,}6 \times 10^9$, $r = 0{,}02$ et $t = 100$ ans pour effectuer ce calcul.

LAVAL UNIVERSITY LIBRARY

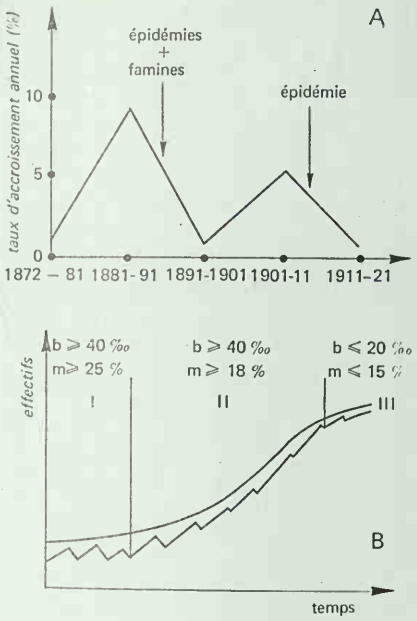


Figure 2.19
A — Type de fluctuation des effectifs d'une population humaine en phase malthusienne : l'Inde entre 1872 et 1925.
B — Courbe de croissance théorique d'une population en voie de stabilisation. Explications dans le texte. D'après Meneghetti in *Marcuzzi, 1968, p. 750*

effectifs est maximale dans l'équation de la courbe logistique, dN/dt est maximum pour $N = K/2$ puis décroît quand N tend vers K. Du même coup, on pourrait prévoir que les effectifs se stabiliseraient autour de la capacité limite $K = 7{,}5$ milliards d'hommes puisque actuellement on les estime à 3,750 milliards.

D'autres arguments peuvent être apportés en faveur de telles conceptions. Si l'on étudie l'évolution numérique d'une population européenne en voie de stabilisation, on vérifie que le nombre d'individus s'inscrit sur une sigmoïde en fonction du temps. Cependant, la population étudiée a présenté au cours de l'histoire un ensemble de fluctuations aléatoires autour d'une position moyenne représentée par la courbe logistique.

On peut distinguer avec Thomson, trois phases dans l'accroissement des effectifs en fonction du temps. Dans la première, dite "malthusienne", l'accroissement a été relativement lent. En effet, les famines et les épidémies ont fait subir d'importantes variations au nombre d'individus, conformément aux vues de Malthus, selon lesquelles ces deux processus naturels seraient les seuls facteurs susceptibles d'entraver la croissance d'une population humaine. Le sous-continent indien a donné, pendant la fin du XIX[e] siècle et dans la première moitié du XX[e] un excellent exemple de croissance démographique dans sa phase malthusienne. Si l'on étudie la variation du coefficient intrinsèque d'accroissement annuel, on trouve que celui-ci a subi d'importantes variations d'une décennie à l'autre, selon la fréquence des catastrophes naturelles pendant la période considérée (Fig. 2.19). Cette phase se caractérise par des taux de natalité et de mortalité très élevés quoique fluctuants, de sorte que le coefficient d'accroissement reste assez faible.

La seconde phase correspond à la période dite *d'accroissement démographique*. Les fluctuations annuelles sont de moindre amplitude. Le coefficient de natalité est comparable à celui de la période précédente, sinon supérieur, et se situe à des valeurs proches du maximum physiologique, mais le taux de mortalité a fortement décru. Cet état de choses résulte des progrès accomplis dans le domaine de la santé publique et dans celui de la production agricole.

La troisième phase, dite de stabilisation néo-malthusienne ([1]) est marquée par l'arrêt progressif du croît démographique, grâce à la limitation volontaire de la natalité à l'aide des méthodes contraceptives. Le nombre moyen d'enfants que doit mettre au monde chaque femme fertile pour assurer le maintien des effectifs à une valeur constante, dépend de nombreux facteurs, en particulier des taux de célibat et d'infécondité, qui varient d'une population à l'autre. Il est estimé de 2,11 à 2,34 enfants par couple selon la valeur de ces derniers. Divers pays d'Europe sont aujourd'hui proches de cette limite.

(1) Le terme est contestable dans la mesure où Malthus ne pouvait prévoir les travaux de Pincus et *a fortiori* les énormes progrès actuels dans le domaine de la biologie de la reproduction humaine . . . la "contrainte morale" qu'il suggèrait pour limiter les naissances prête aujourd'hui à rire . . .

BCU LAUSANNE / CENTRALE DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE

La transition vers la croissance démographique zéro

La croissance démographique zéro est aujourd'hui devenue un impératif catégorique pour la survie de l'humanité.

On en vient donc à traiter des questions fondamentales suivantes : à partir de quel moment et à quel niveau se stabilisera la population humaine ? Un démoécologiste, Frejka (1973) a essayé d'y répondre en faisant diverses hypothèses qui fixent la décroissance du taux de natalité en fonction du temps dans les pays du Tiers Monde et la période à partir de laquelle ils aborderaient à l'image des pays actuellement industrialisés la phase néo-malthusienne. Le but à atteindre est celui d'une humanité aux effectifs stationnaires c'est-à-dire dans laquelle $r = 0$ donc $m = b$ avec m et b minimum. Dans une telle hypothèse, la fertilité des femelles doit s'établir à une valeur strictement égale au niveau de remplacement. Le taux de fertilité totale (TFT) se définit comme le nombre moyen d'enfants engendrés par une femme au cours de sa période reproductive. Le taux net de reproduction (TNR) correspond au nombre total moyen de filles fécondes engendrées par une femme. Un TNR = 1 constitue le niveau strict de remplacement. Un TNR > 1 implique une expansion démographique. Pour que le TNR soit égal à 1, il faut que le TFT soit supérieur à 2 car il y a plus de garçons que de filles dans l'espèce humaine à la naissance et toutes les filles ne donnent pas un enfant. Ainsi, en France, pour que le TNR soit nul il faut que le TFT soit égal à 2,08 et aux Etats-Unis à 2,11.

Frejka a calculé à quel niveau et à quelle date plafonnerait la population mondiale dans les diverses hypothèses précitées.

Du niveau net de remplacement à la croissance démographique zéro.

Atteindre un TNR = 1 ne constitue qu'un préliminaire à la croissance démographique zéro. En effet, décider et obtenir du jour au lendemain (hypothèse utopique !) que chaque femme féconde de la génération reproductive ne donnera dans toute sa vie qu'une fille féconde n'implique pas un arrêt immédiat de la croissance démographique. Il faut en effet tenir compte de la structure d'âge de la population laquelle joue un rôle fondamental en démographie. Une population possédant une classe préreproductive disproportionnée est douée d'un potentiel interne de croissance considérable résultant du nombre très important de futurs parents par rapport à ceux qui constituent la classe reproductive. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, alors qu'en 1972 le TNR a été légèrement inférieur à un, on a enregistré un excédent des naissances sur les décès supérieur à un million d'individus ! Dans le cas du Mexique où il existe 3 fois plus de filles en période préreproductive que de femmes en période reproductive, même si ces filles présenteront un TFT trois fois inférieur à celui de leur mère, l'accroissement en valeur absolue de la population de ce

CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

pays sera exactement égal à son niveau actuel lorsque la jeune génération sera en âge de se reproduire ! Il en sera ainsi tant que la population ne sera pas devenue stationnaire c'est-à-dire aussi longtemps que sa structure d'âge ne sera pas telle que natalité et mortalité s'équilibrent.

Principes de base des prévisions de Frejka

Cet auteur a effectué ses calculs sur la base de départ 1970 où la population mondiale était de 3,6 milliards d'habitants avec un taux d'accroissement de 2 % par an. Nous présentons trois de ses cinq hypothèses de calcul :

1) Voie immédiate vers la stabilisation démographique, le *TNR* = 1 aurait été atteint en 1975.
2) Voie rapide, le *TNR* = 1 serait atteint par l'ensemble de l'humanité entre 2 000 et 2 0005.
3) Voie lente, le *TNR* = 1 serait atteint entre 2 040 et 2 045.

Conclusions sur la croissance et la stabilisation de la population mondiale

A la fin des années 60, le taux de natalité moyen de l'humanité était de 33 %, m égal à 13 % soit un taux moyen annuel d'accroissement de 2 %. Le *TNR* était $\leqslant$ 1,5 dans les pays développés et égal à 3 dans le Tiers Monde, avec une moyenne mondiale de l'ordre de 2 ! En conséquence, l'humanité présentait — et la situation n'a pas changé depuis lors — une structure d'âge déséquilibrée 40 % de la population mondiale ayant moins de 15 ans ! Dans le cas de la *voie immédiate,* la croissance zéro aurait été atteinte à la fin du siècle. Celle-ci aurait impliqué une chute de la natalité de 33 à 18 % entre 10 et 75. Les effectifs humains se seraient alors stabilisés à $5{,}7 \times 10^9$ habitants en l'an 2000. (Fig. 2.19a). Dans le cas de la *voie rapide* qui implique un déclin certes plus graduel de la fertilité mais néanmoins une politique volontariste de limitation des naissances, Frejka suppose que le *TFT,* qui était de 4,7 en 1970 tombe à 2,2 en l'an 2000. Dans ce cas, le taux de croissance annuel serait de 1 % à cette date. Cela implique un déclin plus rapide de la natalité que celui observé aux Etats-Unis ou au Japon p.e au cours des 30 dernières années ! Dans cette hypothèse, la population mondiale se stabiliserait à la fin du XXI^{ème} siècle à $8{,}5 \times 10^9$ habitants. Enfin, dans le cas de la *voie lente,* le *TNR* = 1 serait atteint entre 2 040 et 2 045. Dans cette hypothèse, 70 ans seraient nécessaires pour que le *TFT* tombe de 4,7 à 2,1 et le taux de natalité de 33 à 16 % . En conséquence, la croissance démographique se poursuivrait au rythme actuel et même s'accélérerait jusqu'en 2 020-2 030 par suite de la diminution de mortalité qui compensera la décroissance de fertilité pendant quelques

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

temps (effet conjugué de progrès médicaux et d'une pyramide des âges à prépondérance des classes juvéniles dans le Tiers Monde).

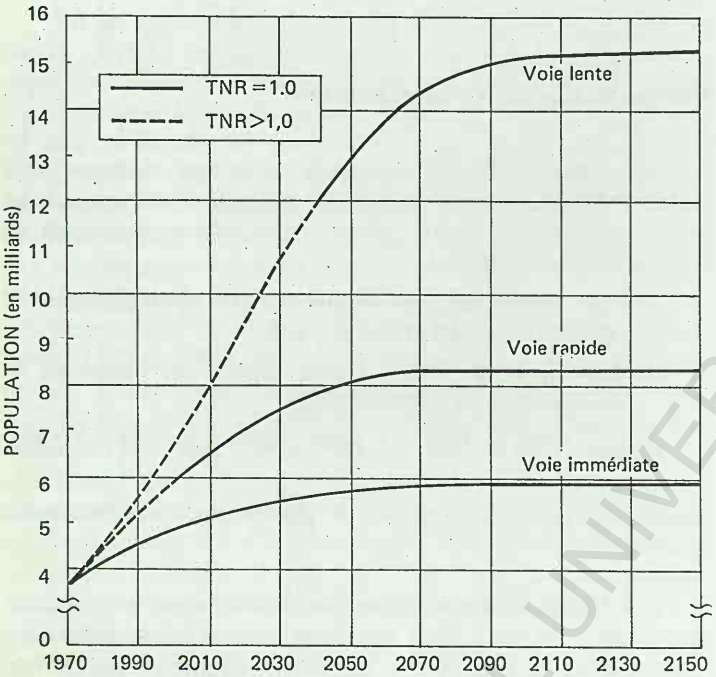


Figure 2.19a
Croissance et stabilisation de la population mondiale dans diverses hypothèses de transition démographique (TNR égal à un en 1970 – voie immédiate, en 2000-2005 — voie rapide ou en 2040-2045 voie lente). D'après Frejka in Population Bulletin, vol. 29, N° 5, 1974)

Ainsi, pendant 60 ans, de 1985 à 2 045, la population mondiale croîtrait de 100×10^6 individus par an. Dans ces conditions, quelques 7 milliards d'hommes vivraient en l'an 2 000 et la stabilisation de la population mondiale s'effectuerait au début du XXII^{ème} siècle à un niveau de $15{,}5 \times 10^9$ habitants !

Variations régionales

Compte tenu de la structure d'âge des pays sous-developpés, la croissance démographique continuera dans ces derniers et se prolongera d'autant plus longtemps que la réduction de natalité sera plus différée. Dans le Tiers Monde (Fig. 2.19b), la population se stabiliserait à 1,65 fois son niveau actuel dans le cas de la voie rapide et à 4,5 fois dans celui de la voie lente. A l'opposé, dans les pays développés qui sont déjà pour le plupart dans la période néomalthusienne, même dans l'hypothèse de la voie lente, les effectifs n'excéderaient pas 1,75 fois leur niveau actuel après stabilisation.

CU-ASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Quoi qu'il en soit, la transition démographique s'accompagnera d'importantes variations dans la distribution des effectifs humains, Alors que l'ensemble Europe et Amérique du Nord correspond à 28 % de la population mondiale, il ne représenterait plus en 2 100 que 15 de cette dernière dans l'hypothèse de la voie rapide. Enfin, des pays comme l'Inde verront leur population augmenter de 580 %, ou le Mexique de 850 % avant qu'elle n'atteigne la croissance démographique zéro par la voie lente ! On constate donc que la situation sera dramatique dans le Tiers Monde si la transition démographique n'était pas suscitée dans les plus brefs délais par une politique volontariste et affirmée de contrôle des naissances.

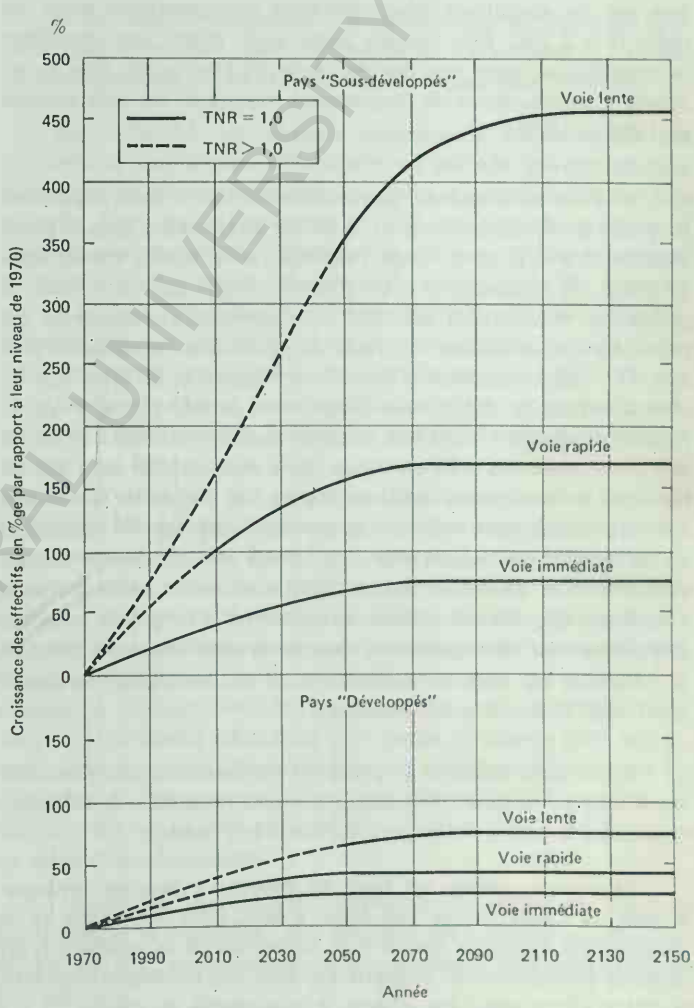


Figure 2.19b
Croissance et stabilisation des effectifs dans le Tiers Monde et les pays "développés" exprimées en pourcentage par rapport à leur niveau de 1970. (D'après Frejka in *Population Bulletin 1974).*

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

A cet égard, l'attitude adoptée par les représentants officiels de divers états du Tiers Monde, encouragée il est vrai par certains dirigeants de pays industrialisés, lors de la conférence des Nations-Unies de Bucarest sur la démographie humaine (août 1974) est pour le moins surprenante. N'est-ce pas une preuve d'irresponsabilité totale que de s'opposer à toute limitation des naissances et prétendre que la démographie est un faux problème lorsque l'on est responsable d'un pays sous-developpé très surpeuplé où le taux de croissance excède 3 % par an et où sévissent chômage chronique et malnutrition ?

La répartition de la population en trois groupes, qui correspondent à ces trois phases, met en évidence les disparités présentées par les conditions d'accroissement démographique selon ces pays (Fig. 2.20). Elle montre aussi qu'il existe une transition démographique pour une grande partie de l'humanité, ainsi qu'en atteste la comparaison de l'importance relative de ces trois groupes en 1945 et 1970.

A la fin de la seconde guerre mondiale, 60 % de la population du globe (entre autres l'Inde et la Chine) se classaient dans la phase malthusienne (1), 20 % (dont l'U.R.S.S. et le Japon) étaient dans la phase de stabilisation des effectifs (Fig. 2.20). En 1970, la proportion relative des effectifs correspondant à chacune de ces phase est très différente. Le stade dit malthusien ne concerne plus que 21 % de la population mondiale. Rappelons en effet que les efforts effectués depuis une vingtaine d'années par la FAO et l'OMS ont amélioré, dans une certaine mesure, les conditions de vie des populations les plus démunies. Si la malnutrition sévit encore de façon endémique en certaines régions, les risques de famine ont été considérablement réduits. Les grandes épidémies ont régressé et les campagnes de prophylaxie ont affecté des continents entiers, ainsi l'OMS a pu mener depuis 1945 une action antipaludéenne concernant plus de un milliard de personnes ! Le groupe en phase d'accroissement démographique s'est de la sorte accru, par suite de la réduction du taux de mortalité dans le tiers-monde, et correspond à 53 % des effectifs globaux (2).

Enfin, celui des pays en phase néomalthusienne, qui s'est aussi accru, comprend les 26 % restants. Il réunit l'ensemble de l'Europe, l'U.R.S.S., le Japon, l'Amérique du Nord et l'Océanie.

Cependant, parmi les pays en phase d'expansion démographique, la Chine mérite une place à part, dans la mesure où le coup d'arrêt qu'elle a donné à la croissance de sa population est riche en enseignements. Aujourd'hui, avec 773 millions d'habitants, la Chine continentale est le pays le plus peuplé du monde. Il y a seulement quinze ans son taux de croissance était comparable à celui des autres pays sous-développés d'alors. Elle s'est depuis engagée dans une transition démographique (large diffusion des

(1) Ainsi, la Chine est passée de 450 millior d'habitants en 1933 à 400 en 1946, par suit des famines, des épidémies et des pertes d vies humaines provoquées par la guerre.

(2) Sont classés dans la phase :
I les pays ou $b \geqslant 40$ ‰/an et $m \geqslant 18$ ‰/a
II les pays ou $b \geqslant 40$ ‰/an et $m < 18$ ‰/a
III les pays ou $b \leqslant 20$ ‰/an et $m \leqslant 15$ ‰/a

UCLA / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

méthodes de contraception dans une population ou l'analphabétisme a laissé la place à un niveau d'éducation sans cesse accru et, paraît-il, imposition des familles comportant plus de deux enfants !). De nos jours, la Chine est en passe d'aborder la période néomalthusienne. Elle figure d'ailleurs, avec les pays industrialisés, dans le groupe au taux d'accroissement le plus bas (inférieur à la moyenne mondiale de 2 %/an en 1971 !).

L'exemple de la Chine est donc à plus d'un égard remarquable car il montre avec quelle rapidité peut progresser une nation dans la voie de la stabilisation de ses effectifs si sa population est placée dans un contexte sociologique favorable à une telle entreprise.

Il ne faudrait cependant pas sous-estimer les énormes difficultés qui s'opposent dans l'ensemble du Tiers Monde ... et des pays industrialisés, à une stabilisation démographique complète.

Tout d'abord, un obstacle considérable est constitué par l'importance du nombre d'habitants en période pré-reproductive dans les nations sous-développées en phase d'accroissement de leurs effectifs. Bien que ce problème ait déjà été évoqué rappelons, à l'aide d'un exemple, ses conséquences. Supposons que le nombre d'individus en âge de se reproduire double dans les dix années à venir dans une population qui a entrepris de limiter son expansion démographique. Il est clair qu'une division par deux du taux de natalité, réduction considérable, ne modifie pas, en valeur absolue, l'accroissement annuel des effectifs. Son effet ne deviendra sensible que lorsque cette génération entrera à son tour dans la période post-reproductive, donc au moins 20 ans après le début des mesures de limitation des naissances. Ce phénomène s'est d'ailleurs produit en Chine, ce qui explique pourquoi le taux d'accroissement annuel est encore assez élevé, de l'ordre de 1,8 %; l'importance de la classe d'âge actuellement reproductive masque la diminution drastique du nombre d'enfants par femme féconde. Dans quelques cas, fort heureusement encore peu nombreux, une autre difficulté réside en l'étroitesse de la marge de manœuvre dont dispose la population, compte tenu des hautes densités déjà atteintes. Pour ces pays, l'existence inéluctable d'un temps de latence rend problématique la possibilité d'une stabilisation des effectifs avant que les disponibilités alimentaires n'aient pas trop baissé. L'exemple du Bengla Desh est là pour rappeler aux sceptiques qu'il ne s'agit pas de spéculations fantaisistes.

L'évaluation des risques immédiats et potentiels pour la pérennité de la biosphère, qui résultent de l'explosion démographique du XX^{e} siècle, représente une entreprise très ambitieuse et fort aléatoire.

En outre, il paraît indispensable d'exclure d'un pareil débat de nombreuses considérations de nature confessionnelle. idéologique ou affective. Ce problème doit être, plus que tout autre, abordé

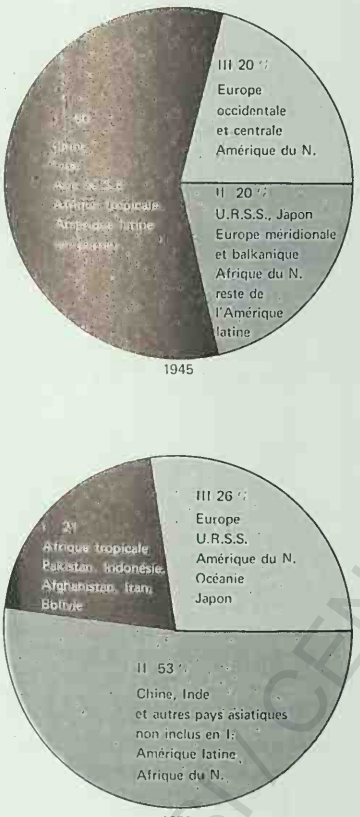


Figure 2.20
Comparaison des stades d'évolution démographique atteint par les divers pays du monde en 1945 et 1970, montrant une certaine tendance à la stabilisation mise en évidence par l'accroissement des effectifs qui ont atteint les phases II et III (cf. fig. 2.19 B).

BYU HASKELL CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

sans dogmatisme, mais au contraire d'une manière scientifique, rationnelle en un mot. Toute autre attitude en ce domaine relèverait de l'obscurantisme.

Ces préalables posés, il ne fait aucun doute que les mauvais augures, tels Von Foerster (1960), qui fixait à 2026 la fin de l'espèce humaine, sont certainement dans l'erreur car ils excluent toute possibilité de régulation des effectifs.

A l'opposé, une autre tendance fallacieuse consiste à minimiser, sinon méconnaître, les conséquences écologiques de la surpopulation (l'attitude passive des instances internationales, lesquelles ont à peine effleuré le problème lors de la Conférence de Stockholm sur l'environnement de l'homme, est fort édifiante à cet égard).

Un autre point de vue fort répandu, même chez des biologistes, consiste à opposer le Tiers Monde, où sévit l'explosion démographique, aux pays industrialisés qui ignoreraient de telles préoccupations.

En réalité, l'Europe figure parmi les régions du globe les plus surpeuplées. La densité y est nettement plus élevée qu'en Chine. A ceux que préoccupe le "péril jaune" il faut rappeler que même la Chine des 18 provinces, laquelle est de loin la plus densément occupée, avec une surface de 5 850 000 km^2 et une densité moyenne de 120 habitants par km^2, est moins surpeuplée que l'Europe occidentale dont la densité excède 150 habitants/km^2 (C.E.E. et Grande Bretagne).

Lorsqu'on prend en considération la "faim de nature" de plus en plus intense que manifestent les populations des pays industrialisés, le surpeuplement de notre continent apparaît dans toute son ampleur. Ceux pour qui la France n'est pas encore assez peuplée devraient réfléchir à cela : chacun d'entre nous ne dispose plus que d'un hectare de territoire national (dont il faut ôter les surfaces urbanisées, la part de routes et aérodromes etc.) si l'on partage celui-ci en lots égaux. Il n'existe que 100 m^2 de forêt pour chaque français . . . la surface d'un appartement ! Si chaque habitant de l'hexagone désire sa part de glacier, il devra se contenter de 10 m^2 . . . et à peine de 20 cm de rivage marin dans la même hypothèse !

Que deviendra notre vieux continent s'il n'est pas mis un terme à la pression, accrue d'année en année, sur les rares îlots de nature sauvage lesquels, livrés à l'appropriation privée et à la spéculation immobilière, fondent comme neige au soleil ? Il apparaît déjà que les espaces naturels n'existent plus en quantité suffisante pour satisfaire les besoins pour les loisirs, autrement dit nous sommes déjà trop nombreux.

FOUNDATION FEDERALE UNIVERSITY LIBRARY

En conclusion, la question capitale sur laquelle s'interrogent aujourd'hui l'ensemble des écologistes n'est pas de savoir si l'humanité mourra ou non de faim comme le prédisait Malthus, mais si la stabilisation définitive de tous les peuplements humains, ceux *des pays industrialisés inclus,* surviendra assez tôt pour que la satisfaction des besoins non seulement matériels mais aussi récréatifs ou culturels de l'homme, soit possible et compatible avec la pérennité de la biosphère.

Il est évident que la transition démographique est encore possible pour les pays du Tiers Monde et l'éventualité d'une stabilisation complète des effectifs de l'humanité loin d'être exclue. Mais il est difficile de prévoir dans quels délais ces objectifs seront atteints. Souhaitons qu'ils le soient avant que la réalité ne confirme les appréhensions de R. Dubos.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

"Aveugle à la nécessité de coopérer avec la nature, l'homme passe son temps à détruire les ressources de sa propre vie. Encore un siècle comme celui qui vient de s'écouler et la civilisation se trouvera en face de la crise finale. Bien que la conscience terrifiée du danger tende à se faire de plus en plus largement sentir... il n'en reste pas moins que nulle part on est encore maître de la situation".

F. Osborn : *Our plundered planet.* 1948

DEUXIÈME PARTIE

LA POLLUTION DE LA BIOSPHÈRE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE III

Chapitre III — Le problème des pollutions et ses implications écologiques 163

Nature et modalités de pollution de l'environnement
Historique 163
La production d'énergie cause primordiale de pollution 165
La diversification de polluants chimiques et l'accumulation des déchets 167
Définition des pollutions 170
Classification des pollutions 170
Dispersion et circulation des substances polluantes dans la biosphère 172
Circulation atmosphérique des polluants 172
Structure de l'atmosphère 172
Cinétique des polluants dans l'atmosphère 173
Incorporation des polluants à la biomasse 176
Existence de concentreurs biologiques 177
Accumulation des polluants dans les chaînes trophiques 178

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

III
LE PROBLEME DES POLLUTIONS ET SES IMPLICATIONS ECOLOGIQUES

NATURE ET MODALITES DE POLLUTION DE L'ENVIRONNEMENT

Historique

A l'encontre d'une opinion fort répandue, le problème des pollutions n'est pas un phénomène récent ou accidentel, mais compte en réalité, parmi les plus antiques. Ses origines remontent aux époques protohistoriques lorsque se constituèrent les premières cités, avec leurs ruisseaux d'écoulement des effluents domestiques et l'entassement dans les rues de détritus divers. Depuis ces temps reculés, on peut affirmer que la pollution urbaine a toujours sévi. Ainsi, en France, un édit de Charles VI, daté de 1382, interdisait l'émission de fumées "nauséabondes et malodorantes" dans la ville de Paris. Mais, quoi qu'il en soit, les pollutions demeurèrent des plus limitées dans leur nature et leur étendue jusqu'à l'avènement de la civilisation industrielle. En effet, les données de la technologie moderne confèrent aujourd'hui aux problèmes des émissions de foyers industriels ou domestiques, comme à celui des eaux usées et des détritus urbains, une ampleur sans précédent. En outre, à ces causes anciennes de contamination de l'environnement par les résidus de l'activité humaine s'en ajoutent de nouvelles, liées par exemple aux récents développements de la chimie organique de synthèse et de l'énergie nucléaire.

Tous ces problèmes résultent de la création par l'homme de déchets qu'il ne cherche pas à détruire ou ne sait pas recycler. Tandis que population et pollution croissent de façon ininterrompue, le pouvoir autoépurateur du milieu naturel suit une évolution inverse en fonction du temps, vers sa saturation sinon vers sa neutralisation complète.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Par ailleurs, il faut de nos jours compter avec un nouvel état d'esprit du consommateur, tout au moins dans la majorité des pays capitalistes, qui le pousse au rejet des objets non seulement lorsqu'ils sont usés mais aussi lorsqu'ils sont démodés. La société occidentale, dite de "consommation", ne se soucie aucunement des ressources naturelles, mais de plus accélère artificiellement (1) leur épuisement. Elle encourage, — grâce à des efforts publicitaires massifs, qui recourent aux méthodes les plus raffinées de conditionnement psychologique des individus —, le renouvellement accéléré des biens de consommation, alors qu'ils sont encore utilisables. Comme l'écrit fort à propos Labeyrie (1972) : *"pour éviter que des réfractaires résistants à l'action des mass-media ne conservent une marchandise vite démodée... elle supprime les modèles commercialisés, rendant impossible le remplacement des pièces usagées et obligeant ainsi au renouvellement entier. Avec de tels principes, le PNB s'élève, paraît-il. En fait, il y a eu gaspillage d'énergie y compris de force de travail humaine — et de matières premières, ce qui rapproche le moment où le déficit en ressources naturelles risque d'entraîner l'économie humaine vers son déclin"...*

(1) Le budget publicité de la majorité d grandes firmes industrielles d'Europe occide tale et d'Amérique du Nord est d'importan supérieure à leur budget pour la recherc scientifique et technologique !

D'autres facteurs, eux aussi de nature sociologique, aggravent le problème des pollutions et lui confèrent une ampleur angoissante pour l'écologiste. L'urbanisation accélérée des pays industrialisés constitue, à bien des égards, le plus préoccupant d'entre eux. Il y a quarante ans par exemple, près de la moitié de la population des pays d'Europe occidentale vivait à l'extérieur des villes. Depuis, l'exode rural s'est amplifié tandis que s'édifiaient des métropoles tentaculaires comptant plus de dix millions d'habitants. Ainsi, douze millions de personnes vivront dans la région parisienne en 1980. A cette époque, 80 % des Français habiteront dans des grandes villes. De nos jours existe déjà, sur la côte orientale des Etats-Unis, une gigantesque mégalopolis de 35 millions d'habitants, qui englobe les villes de New-York, Philadelphie et Washington ! .

La concentration des industries et de l'habitat dans les mêmes lieux multiplie les nuisances, d'autant plus que les espaces verts nécessaires à l'épuration de l'atmosphère font l'objet de convoitises diverses et s'amenuisent sans cesse.

Enfin, la technologie moderne a permis, grâce à l'automation et divers autres progrès dans les méthodes de fabrication, une expansion continue de la production industrielle et de la consommation *per capita.* Non seulement notre civilisation accumule de ce fait des masses énormes de déchets, mais elle élabore une multitude de substances minérales ou organiques non biodégradables, voire indestructibles (matières plastiques, certains pesticides, céramiques, métaux inoxydables... et radionucléides). Elle a de la sorte perturbé un des mécanismes essentiels du fonctionnement de la biosphère : l'échange ou plutôt la circulation permanente d'éléments entre les êtres vivants et le milieu inorganique.

BOUVIER/CENTAUR UNIVERSITY LIBRARY

Pendant des millénaires, les causes de pollution furent peu nombreuses et d'importance dérisoire. Elles résultaient surtout de contaminations très localisées d'eaux superficielles ou de nappes phréatiques par des bactéries pathogènes et des substances fermentescibles contenues dans les effluents et les détritus d'origine domestique.

Il en fut ainsi jusqu'à la fin du 18e siècle, au cours duquel les pollutions de nature industrielle demeurèrent des plus restreintes malgré le remarquable accroissement de l'artisanat et du commerce, ainsi que l'apparition de grandes manufactures. Celles-ci affectaient de très petites surfaces situées aux alentours des zones d'extraction et surtout de traitement des minerais de métaux non ferreux (plomb, zinc, cuivre, mercure). Cependant, les méfaits provoqués sur le milieu naturel par ces premières pollutions industrielles ne passèrent pas inaperçus malgré leur importance restreinte. Au début du 18e siècle, les Gallois de la région de Swansea pouvaient constater déjà que la contamination des sols par les usines qui traitaient les minerais de zinc et de cuivre faisait disparaître toute végétation. Le même phénomène s'observait à cette époque en Sicile, aux alentours des *Calcarone,* installations primitives qui servaient au raffinage du soufre. Dès 1700, les habitants de la ville de Finale, en Italie, entreprirent une action en justice contre une manufacture de chlorure de mercure dont les émanations avaient empoisonné de nombreux citadins.

Ces cas de pollutions demeuraient toutefois exceptionnels sous l'ancien régime. Quant aux sources d'énergie, elles n'étaient pas du tout polluantes (roues à aubes hydrauliques, moulins à vent, traction animale...), le seul combustible utilisé, le charbon de bois (1), émettant des fumées peu nocives. Cet usage du charbon de bois fut malgré tout la cause d'une déforestation catastrophique de bien des régions d'Europe occidentale.

Au cours du siècle dernier, la grande industrie naissante fit de plus appel aux combustibles fossiles, charbon puis pétrole, pour obtenir les quantités croissantes d'énergie nécessaires au fonctionnement des usines et des nouveaux modes de transport. En 1900, le charbon couvrait 90 % des besoins énergétiques mondiaux contre 4 % seulement pour le pétrole. Depuis, le gaz naturel est venu s'ajouter à ces combustibles et la part des hydrocarbures fluides n'a cessé de s'accroître au détriment du charbon.

(1) Rappelons cependant que c'est au XVIIIe siècle que l'on commença à faire appel à la houille, par suite de la disparition des forêts en Europe. En 1800, P. Lebon inventa l'utilisation du gaz produit par pyrogénation du charbon.

La production d'énergie cause primordiale de pollution

Les produits pétroliers (huile minérale et gaz) représentaient 70 % de la consommation énergétique totale des Etats-Unis en 1968. Les besoins en énergie de ce pays se sont accrus de 70 fois en cent ans.

Les quantités de pétrole brut importées par la France sont passées de cinq millions de tonnes en 1939 à cent millions de tonnes en 1970.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La production mondiale d'hydrocarbures liquides a dépassé 2,5 milliards de tonnes en 1971. Il n'est pas étonnant qu'à un tel rythme d'extraction, le problème des ressources se pose déjà en termes graves pour le pétrole et le gaz naturel.

En effet, l'emploi de ces substances se situe à tous les niveaux d'activité dans notre civilisation. Il se place aussi bien en amont de la production industrielle (usines, centrales électriques), qu'en aval (automobiles, usages domestiques). En effet, et bien que cela représente un gaspillage de ressources non renouvelables, les hydrocarbures fossiles servent avant tout à être brûlés pour produire de l'énergie. Ainsi en France, 63 % du pétrole importé sont consommés dans les foyers des centrales thermiques et des installations industrielles, 24 % alimentent des moteurs à combustion interne (automobiles, diesels, réacteurs) et seulement 7 % sont utilisés comme matière première dans la chimie organique pour synthétiser diverses substances.

Une autre donnée permet de saisir l'importance de la colossale consommation d'énergie qui caractérise la civilisation industrielle : la masse totale de combustibles fossiles brûlés en 1959 est équivalente à 5 % de la quantité d'énergie solaire fixée chaque année par l'ensemble des producteurs primaires de l'écosphère sous forme de composés organiques.

La prise en considération de ces faits nous permet d'entrevoir l'importance actuelle de la production d'énergie dans les processus de pollution de la biosphère. L'usage des hydrocarbures fossiles à tous les stades de l'activité humaine les fait figurer au premier rang des sources de pollution, car il engendre des masses énormes de résidus de combustion.

Mais de nouvelles causes de préoccupation, liées aux procédés de production de l'énergie, sont apparues au cours des dernières années et inquiètent aujourd'hui de nombreux biologistes. Celles-ci résultent de l'impact croissant de la technologie nucléaire sur le milieu naturel.

Aux appréhensions justifiées qui accompagnent les essais dans l'atmosphère d'engins dits de "dissuasion" et, de façon plus générale, à celles suscitées par la multiplication des armements nucléaires, s'est récemment ajoutée la crainte d'une pollution généralisée et insidieuse par les divers radionucléides produits par les centrales électriques nucléaires.

Malgré les multiples déclarations apaisantes des responsables du développement de l'électro-nucléaire (EDF par exemple), les risques ne paraissent pas *a priori* négligeables. Les redoutables effets des radiations ionisantes, en particulier leur action mutagène, exigent que les seuils de concentration admissibles — si tant est qu'ils existent — soient fixés avec la plus grande rigueur et non pas révisés en hausse comme certains le suggèrent.

UCSB SCIENCE LIBRARY UNIVERSITY

La diversification des polluants chimiques et l'accumulation des déchets

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, la chimie organique a mis à notre disposition une multitude de substances nouvelles. Parmi elles, les matières plastiques et les détersifs ménagers ont, par exemple, apporté de nouveaux éléments de confort à la vie quotidienne.

Dans un autre domaine, celui de l'agronomie, la découverte des pesticides de synthèse : insecticides, fongicides, herbicides, a permis d'accroître le rendement des cultures tout en diminuant la part de main d'œuvre nécessaire par unité de surface.

D'autre part, l'usage croissant de la fumure minérale, par apport de composés azotés, de phosphates et de sels de potasse, a joué aussi un rôle déterminant dans cette augmentation de la productivité en agriculture (la consommation mondiale de fertilisants qui n'excédait pas 7 millions de tonnes en 1945, a dépassé 53 millions en 1968, Chine exclue).

Malheureusement, les grands services rendus par l'usage en agriculture de ces divers composés se sont accompagnés d'une multitude d'effets nocifs ou indésirables, liés à la contamination du milieu naturel par des quantités croissantes de ces substances.

On constate en définitive que les agents polluants dont l'action sur la biosphère est la plus préoccupante sont le fruit de technologies inexistantes avant la seconde guerre mondiale et qui se sont développées depuis lors. On peut affirmer que, dans les pays industrialisés, la crise de l'environnement contemporaine, bien qu'intensifiée par la forte densité de population de beaucoup d'entre eux, ne provient pas de l'accroissement démographique, d'ailleurs fort limité depuis 1945. B. Commoner (1971) souligne à juste titre le rôle déterminant du "progrès" technologique dans la pollution du milieu naturel aux Etats-Unis depuis 1946. Selon cet auteur, la population a crû de 42 % depuis cette date et le PNB par habitant de 126 %, mais le niveau de pollution s'est élevé de dix fois dans le même laps de temps (de vingt fois même selon certaines estimations !).

Quel est, à ce propos, l'ordre de grandeur des diverses pollutions et des nuisances qu'elles entraînent à l'heure actuelle ? Les bilans se multiplient chaque jour et, parmi le flot croissant de données statistiques, nous choisirons au hasard quelques exemples.

Aux Etats-Unis, nation où les problèmes de pollution atteignent aujourd'hui des dimensions catastrophiques, il se rejette chaque année 125 millions de tonnes de matières solides d'origine urbaine. Dans celles-ci, on dénombre 48 milliards de boîtes de conserve vides, 26 milliards de bouteilles et fûts, 65 milliards d'emballages métalliques ou plastiques, etc. Le coût annuel total de l'opération d'enlèvement de ces déchets et de leur décharge s'élevait en 1965 à 3 milliards de dollars ! .

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dans ce même pays se commercialisent chaque année cinq cents nouveaux composés organiques de synthèse sans que leurs propriétés toxicologiques n'aient donné lieu au minimum d'études préalables jugées nécessaires par des experts compétents en ce domaine.

En France, l'industrie élimine chaque année deux millions de tonnes d'anhydride sulfureux dans l'atmosphère de nos villes et rejette six millions de tonnes de déchets solides dans nos cours d'eaux qui se transforment, lentement mais sûrement, en égouts à ciel ouvert. L'automobile intervient aussi de façon déterminante dans la pollution atmosphérique des villes de notre pays. Les gaz d'échappement contaminent l'air que nous respirons par de nombreux composés toxiques. Ainsi 75 % du plomb contenu dans les carburants à haut indice d'octane passent dans l'atmosphère. Or chaque voiture particulière émet 1 kg/an de ce métal dans ses gaz brûlés. Par ailleurs, le moteur à combustion interne fonctionnant à l'essence émet 350 g de composés toxiques divers par litre de carburant consommé — le diesel ne lui est pas supérieur sur ce point malgré les affirmations... des transporteurs routiers. Comme la majorité des automobiles sont concentrées dans les zones urbaines ([1]), on comprend le rôle déterminant joué par la voiture particulière dans la pollution de l'atmosphère des villes.

(1) Aux Etats-Unis, 97 % des automobiles appartiennent à des citadins.

Un autre aspect, non moins préoccupant, de la pollution de la biosphère réside en l'étendue des surfaces exposées aux innombrables substances toxiques produites par l'activité humaine. Jusqu'à une date récente, celles-ci se localisaient autour des zones urbaines et industrielles. Mais depuis 1945, la contamination du milieu naturel par les produits de la technologie moderne s'étend à des régions de plus en plus reculées et l'on peut affirmer que la menace est aujourd'hui à l'échelle planétaire.

Vers 1956, l'opinion publique internationale s'alarma à juste raison des retombées d'I^{131}, de Sr^{90}, de Cs^{137} et d'autres radionucléides, provoquées par l'expérimentation à l'air libre d'engins nucléaires, sur l'ensemble de l'hémisphère boréal. On s'est en revanche beaucoup moins inquiété, jusqu'à une date récente, de la contamination de l'ensemble de l'écosphère — océan mondial inclus —, par diverses matières premières et substances synthétisées par la chimie moderne. Faut-il rappeler que près de cinq millions de tonnes de pétrole sont chaque année rejetées à la mer par accident et le plus souvent volontairement (cela correspond à près de cinquante "Torrey-Canyon" !), que l'on trouve aujourd'hui des fragments de matières plastiques dérivant en pleine mer des Sargasses, à des centaines de kilomètres des côtes les plus proches ?

Faut-il préciser que des agents plastifiants très nocifs — tels que les polychlorobiphényles — empoisonnent peu à peu l'atmosphère de toute la planète et que l'on trouve par exemple aujourd'hui des traces de ces substances dans l'organisme d'animaux qui vivent dans le Grand Nord Canadien ?

BOURASSA UNIVERSITY LIBRARY

Tel est aussi le cas de certains pesticides, comme le DDT, dont la stabilité moléculaire est telle qu'ils persistent dans l'ensemble des écosystèmes et contaminent de façon insidieuse tous les réseaux trophiques. N'a-t-on pas pu mettre en évidence des traces de cet insecticide dans les graisses de phoques de Weddell et de manchots antarctiques ?

L'océan constitue en effet l'ultime zone d'accumulation de tous les résidus toxiques produits par la technologie moderne, et des substances de synthèse aux effets souvent tout aussi pernicieux qu'insoupçonnés. On estime par exemple que le quart du total de DDT fabriqué à ce jour est entreposé dans l'hydrosphère à l'heure actuelle. Avec une surprenante persévérance, la civilisation occidentale continue à considérer le milieu marin, à la fois comme une poubelle et un garde-manger.

Comme le fait remarquer un récent rapport du MIT ([1]) : *"le déclin de poissons marins et les niveaux d'accumulation du DDT dans leurs tissus à des taux inacceptables pour l'homme ne peuvent être qu'accélérés par la libération de cette substance dans l'environnement. Certains risques liés à l'usage du DDT, particulièrement difficiles à quantifier, méritent une très sérieuse évaluation. On ignore le taux auquel il se dégrade en produits inoffensifs dans l'écosystème marin. Pour certains de ces produits de dégradation, la durée de demi-vie est de l'ordre de quelques années à quelques décennies... Plus on étudie les problèmes, plus on met en évidence des effets inattendus. Si l'on fait une rétrospective des conséquences écologiques observées au cours des dernières années, on conclut que ces risques, (liés aux nouvelles technologies) ont été immensément sous-estimés".*

(1) *Man's impact on the global environment.* MIT Press, 1971, Cambridge, Massachussetts, p. 137.

En effet, le problème des pollutions est multiforme. On peut certes prévoir, d'après des recherches de laboratoire, l'action d'une substance sur un type d'organisme, mais il n'en est plus de même dans la nature. Les composés que l'homme disperse dans l'écosphère réagissent sur l'ensemble des biocœnoses et non sur sur quelques espèces particulièrement sensibles. En outre, se produisent des effets de synergisme difficiles à prévoir par avance. Dans de nombreux cas, certaines conditions de milieu, voire la présence d'un polluant particulier, exaltent la toxicité de substances qui pourraient paraître *a priori* inoffensives *in vitro.* Citons par exemple le rôle déterminant que joue dans la pollution des océans par les insecticides organochlorés, la présence de flaques de pétrole à la surface de ces derniers... de même, le mercure minéral, peu toxique à l'état métallique, est converti par les bactéries benthiques en méthyl-mercure, de toxicité redoutable.

Il apparaît en définitive que les principales conséquences biologiques des pollutions résultent de leurs effets écologiques. C'est ce que nous allons mettre plus particulièrement en évidence dans ce qui suit.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Définition des pollutions

Fort utilisé de nos jours, le terme de pollution recouvre bien des acceptions et qualifie une multitude d'actions qui, d'une façon ou d'une autre, dégradent le milieu naturel. Ce vocable désigne sans aucune ambiguïté les effets de l'ensemble des composés toxiques que l'homme libère dans l'écosphère mais en revanche, son emploi paraît moins évident lorsqu'il se rapporte à des substances peu dangereuses ou inoffensives pour les êtres vivants mais exerçant une influence perturbatrice sur l'environnement du seul fait de leur trop grande concentration. C'est peut-être le cas du gaz carbonique dont la concentration dans l'atmosphère s'accroît par suite de la combustion d'immenses masses d'hydrocarbures fossiles.

Polluer signifie étymologiquement profaner, souiller, salir, dégrader. Ces vocables ne prêtent pas à équivoque, bien qu'ils recouvrent des notions fort générales et nous paraissent en définitive tout aussi adéquats que les longues définitions données par les experts. Parmi celles-ci, nous retiendrons la suivante, publiée dans un rapport rédigé en 1965 par le comité scientifique officiel de la Maison Blanche intitulé : *"Pour restaurer la qualité de notre environnement".*

"La pollution, dit ce rapport,*est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature".*

Dans cette définition, le terme de pollution est pris à son sens le plus large car il englobe en définitive toute action par laquelle l'homme dégrade la nature.

Classification des pollutions

Donner une classification des pollutions n'est pas une entreprise aisée car on peut la réaliser à partir de nombreux critères, mais aucun n'est entièrement satisfaisant. On peut tout d'abord grouper les agents polluants selon leur nature : physique, chimique, biologique etc. ou, de façon écologique, en considérant le milieu dans lequel ils sont émis et où ils exercent leurs méfaits. On peut aussi se placer d'un point de vue anthropocentrique et considérer le milieu ou la manière par laquelle ils contaminent l'organisme humain : inhalation, ingestion, contact cutané . . . audition . . .

En réalité, aucune de ces méthodes n'est vraiment satisfaisante car une même substance peut présenter diverses modalités d'action.

ROYAL ROADS MILITARY COLLEGE LIBRARY

Le mercure libéré dans les sols passera dans l'atmosphère et les eaux, il peut être à la fois ingéré avec les aliments ou inhalé à l'état de vapeur etc.

Le tableau XX figure la classification que nous avons adoptée. Celle-ci s'efforce de réaliser un compromis entre diverses modalités, sans pour autant dissimuler le caractère artificiel d'une telle entreprise.

Tableau XX – Classification des principaux types de pollutions et de nuisances

1. *Pollutions physiques*

Radionucléides (rayonnements)

Caléfaction (ou pollution thermique)

Bruit et vibrations à basse fréquence (infra-sons)

2. *Pollutions chimiques*

	Atmosphère	Eaux continentales et océaniques	Sols
Dérivés gazeux du carbone et hydrocarbures liquides	+	+	
Détersifs		+	
Matières plastiques	+	+	+
Pesticides et autres composés organiques de synthèse	+	+	+
Dérivés du soufre	+	+	+
Dérivés de l'azote	+	+	+
Métaux lourds	+	+	+
Fluorures	+	+	+
Particules solides *"Aérosols"*	+		+
Matières organiques fermentescibles		+	+

3. *Pollutions biologiques*

Contamination microbiologique des milieux inhalés et ingérés (bactéries et virus)

Modification des biocœnoses par introduction intempestive d'espèces animales ou végétales.

4. *Nuisances esthétiques*

Dégradation des paysages et des sites par l'urbanisation sauvage ou un aménagement mal conçu.

Implantation d'industries dans les biotopes vierges ou peu modifiés par l'homme.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

DISPERSION ET CIRCULATION DES SUBSTANCES POLLUANTES DANS LA BIOSPHERE

Le rejet d'agents polluants dans l'environnement est un phénomène complexe qui ne se limite en aucun cas à l'aspect, en apparence ponctuel, de l'émissaire d'égout se déversant dans un fleuve ou du panache de fumée d'une usine s'élevant dans l'air.

Aucune des substances que l'homme libère dans la biosphère ne reste en place. Dans la plupart des cas, elles émigrent même fort loin du lieu d'émission. La circulation dans l'air, les eaux et les sols les disperse peu à peu dans l'ensemble des écosystèmes.

Circulation atmosphérique des polluants

Les mouvements atmosphériques jouent un rôle fondamental dans la répartition des agents polluants. En effet, qu'il soit gazeux, liquide ou même solide, tout composé organique ou minéral peut théoriquement passer dans l'air. Evident dans le cas des gaz, ce passage s'effectue pour les liquides sous forme d'aérosol ou par évaporation si leur tension de vapeur est suffisante. Quant aux solides, ils peuvent tous être entraînés dans l'atmosphère, à condition qu'ils se présentent sous forme de fines poussières.

Certains des agents polluants introduits par l'homme dans l'atmosphère en sont des constituants naturels — ainsi, l'anhydride carbonique, les oxydes d'azote, l'anhydride sulfureux ou le mercure s'ajoutent aux quantités normalement présentes dans l'air où les introduisent divers phénomènes, tels le volcanisme ou certains processus biogéochimiques. D'autres, comme les radionucléides, les pesticides ou diverses substances organiques de synthèse, sont d'origine artificielle.

Ce sont les courants ascendants et les vents qui dispersent les substances polluantes en altitude et en latitude et assurent ainsi leur circulation atmosphérique. Cette contamination de l'atmosphère ne se fait pas au hasard mais selon des mécanismes bien définis, liés aux divers paramètres qui contrôlent les phénomènes météorologiques.

STRUCTURE DE L'ATMOSPHERE

L'atmosphère comporte plusieurs zones qui se succèdent en altitude et dans lesquelles la pression décroît progressivement. Ce sont la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et l'ionosphère (ou encore thermosphère).

Les deux premières couches, les plus basses et les plus denses, présentent seules un intérêt pour le sujet qui nous préoccupe. Elles jouent en effet un rôle déterminant dans la contamination globale de la biosphère car elles assurent un transfert des polluants vers les

CORNELL UNIVERSITY LIBRARY

lieux les plus reculés, les plus à l'écart des régions peuplées et industrialisées. Ainsi a-t-on pu montrer la présence de DDT dans les neiges antarctiques ([1]) qui tombent actuellement dans la partie centrale de l'inlandsis, en une zone située à plusieurs milliers de kilomètres des localités les plus proches où cet insecticide aurait pu être utilisé (Tasmanie ou Sud de l'Argentine !).

La troposphère constitue la plus basse des couches atmosphériques. Elle renferme les 8/10e de l'ensemble de ces dernières (en masse). La température y décroît rapidement lorsqu'on s'élève jusqu'à la tropopause, sa limite supérieure, située vers neuf kilomètres d'altitude aux pôles et quinze kilomètres à l'équateur. Au niveau de la tropopause, la température est de l'ordre de $-60°$ C. Au-delà, et jusqu'à une cinquantaine de kilomètres d'altitude, s'étend la stratosphère, zone dans laquelle l'air est disposé en couches stratifiées, d'où son nom, et où la température décroît pour atteindre le minimum de $-85°$ C vers dix-huit kilomètres d'altitude au-dessus des régions équatoriales.

Bien que l'ozone (O_3) existe dans l'air à toute les altitudes, c'est dans la stratosphère qu'il se rencontre aux plus fortes concentrations, constituant la "couche" ou écran d'ozone. En réalité, la teneur de l'air en ozone présente d'importantes variations selon l'altitude, la latitude et la saison. Le maximum de densité est atteint vers une trentaine de kilomètres dans les régions équatoriales et dix-huit kilomètres au niveau des pôles (Fig. 3. 1).

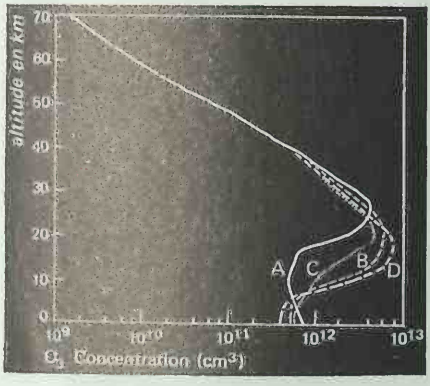


Figure 3.1
Concentration en Ozone de l'atmosphère aux diverses altitudes et latitudes. A, sous les tropiques ; B, au 45° N ; C, en été et en hiver ; D, en hiver sous le cercle polaire arctique. D'après Mac Clatchey et coll. in *Varney et Mac Cormac 1971*

L'écran d'ozone qui arrête la plupart du rayonnement ultraviolet, en particulier la bande de plus faible longueur d'onde — la plus nocive —, a joué un rôle essentiel dans l'évolution de la biosphère, car sa fonction protectrice a permis la colonisation des continents émergés par les êtres vivants.

La pauvreté en vapeur d'eau constitue une autre particularité de la stratosphère. Cela résulte des très faibles températures qui y règnent. La teneur en eau y est en moyenne 10 000 fois inférieure à celle des basses couches de l'atmosphère.

CINETIQUE DES POLLUANTS DANS L'ATMOSPHERE

Il est évident que les mouvements de circulation atmosphérique jouent un rôle essentiel dans la dispersion des polluants. La connaissance des courants troposphériques et stratosphériques est donc essentielle pour comprendre par quels mécanismes s'effectue la contamination de la biosphère. Ces derniers ont été précisés par diverses recherches effectuées depuis quelques décennies à l'aide d'aéronefs, de ballons-sondes de hautes performances et, plus récemment, grâce aux divers satellites météorologiques.

Nous connaissons aujourd'hui avec assez de précision le sens et la vitesse des principaux courants atmosphériques. Ainsi, on a pu montrer l'existence d'un vent dominant d'Ouest qui souffle au niveau de la tropopause dans l'hémisphère Nord. Sa vitesse, 35 m/s

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

en moyenne, permet un transit circumterrestre de toute substance située à ce niveau en douze jours ! Cela explique la célérité avec laquelle les particules émises par une explosion nucléaire ou une éruption volcanique se dispersent dans l'ensemble de l'atmosphère planétaire (Fig. 3.2).

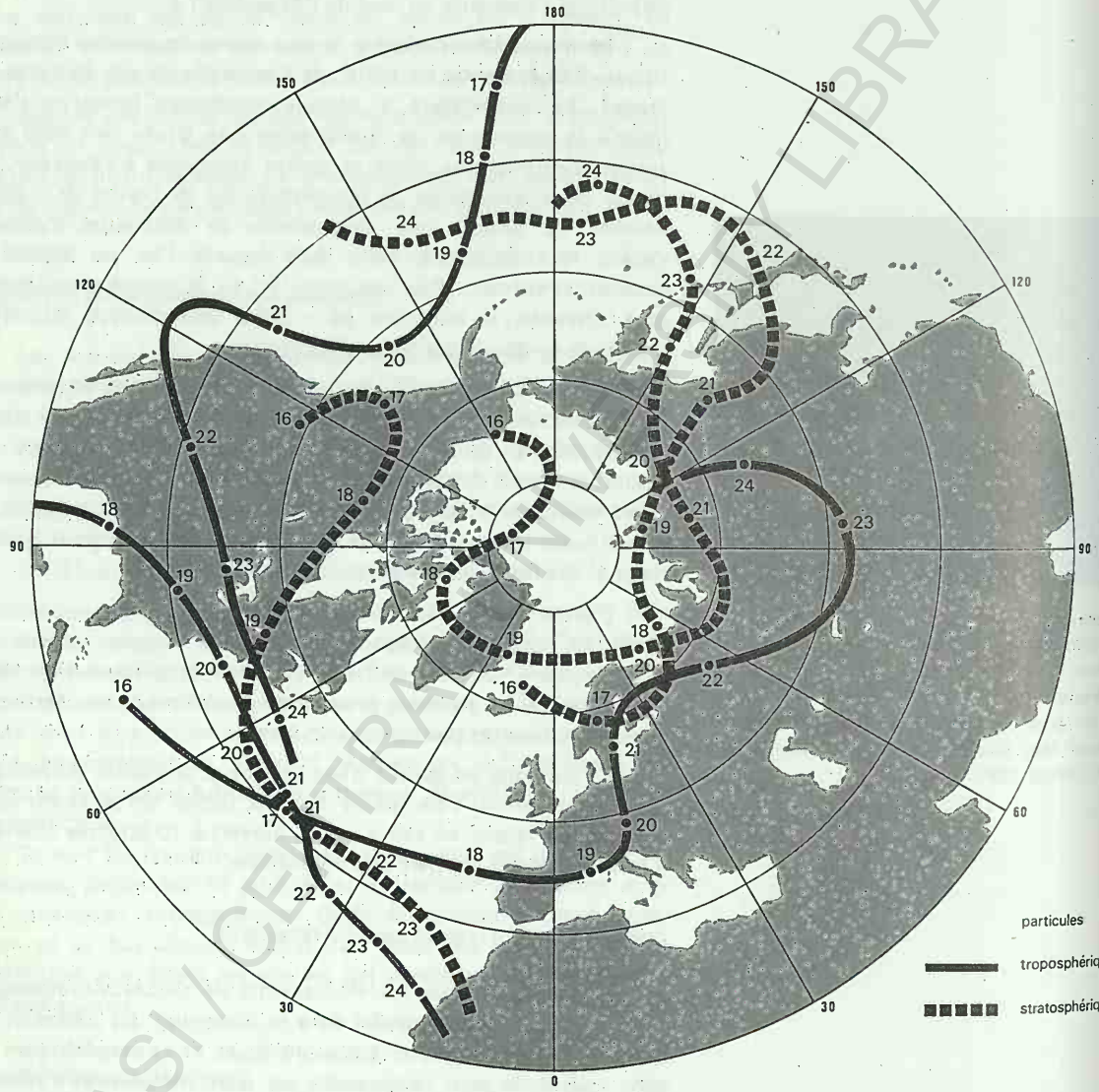


Figure 3.2
Mouvements des masses d'air autour du globe. Les chiffres correspondent aux jours successifs du mois d'avril 1964 où furen suivis ces déplacements atmosphériques. D'après Newell, Scient. American, janvier 1971, p. 34

A ces courants horizontaux sont associés des mouvements verticaux des masses d'air qui permettent une circulation atmosphérique du Nord vers le Sud. La combinaison des vents Ouest-Est avec une dérive ascensionnelle au niveau des basses altitudes

engendre un type de circulation atmosphérique dénommé *cellule de Hadley*. Celui-ci permet l'échange des masses d'air entre les deux hémisphères au niveau de la troposphère des régions équatoriales (Fig. 3.3).

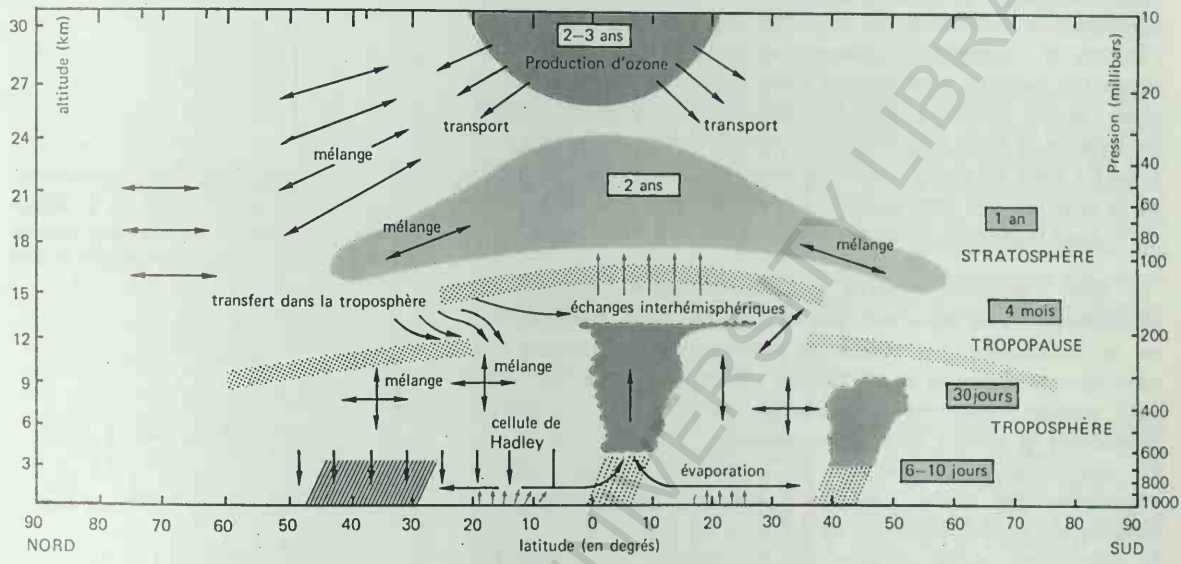


Figure 3.3
Distribution et mouvements de l'ozone (en foncé), de l'eau et des aérosols (en gris), dans l'atmosphère terrestre. Les chiffres représentent les temps moyens de séjour. D'après Newell, Scient. American, Janvier 1971, p. 33.

ozone
eau
aérosols

Les déplacements verticaux des masses d'air interviennent aussi de façon déterminante dans la circulation et la dispersion des polluants. L'existence des cumulo-nimbus, ces énormes nuages d'orage qui peuvent atteindre une quinzaine de kilomètres de hauteur, atteste de l'importance de ces mouvements ascensionnels, dont la vitesse dépasse parfois 30 m/s.

Quasi immédiate au niveau de la troposphère, la dispersion verticale des polluants est, au contraire, très lente dans la stratosphère, à cause de la faible vitesse à laquelle se font les échanges entre couches d'air d'altitudes différentes. En effet, à ce niveau, les mouvements verticaux atteignent tout au plus quelques cm/s. Ainsi, par suite de la lenteur des migrations verticales dans la strastosphère, des particules introduites à ces altitudes peuvent y séjourner des années.

On a pu calculer que la durée moyenne pendant laquelle une particule insédimentable ([1]) demeure dans la stratosphère est de deux ans. Celle-ci n'est que de quatre mois au niveau de la tropopause, de trente jours dans la haute troposphère et seulement de six à dix jours dans les couches les plus basses de l'atmosphère (trois kilomètres d'altitude et au-dessous, Fig. 3.3).

Si l'on examine maintenant les durées de séjour dans la troposphère des gaz étrangers que l'homme y introduit, on constate

(1) De telles particules constituent ce que les spécialistes de la pollution atmosphérique dénomment improprement des *"aérosols"*.

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

que celles-ci sont plus élevées, de l'ordre de deux à quatre mois. Ce phénomène est d'autant plus accusé qu'il s'agit de substances pour lesquelles il n'existe pas de mécanisme biogéochimique efficace permettant leur extraction de l'atmosphère, puis leur transformation ou leur accumulation dans l'eau et les sols. De tels processus font défaut pour divers composés volatils de synthèse peu réactifs que l'homme libère dans l'air et *a fortiori* pour les gaz rares, dont l'absence de réactivité chimique est bien connue. Ainsi ces éléments peuvent-ils persister pendant une durée indéterminée dans l'atmosphère, ce qui soulève de sérieuses difficultés, à long terme, au sujet de certains de leurs radioisotopes à période moyenne ou longue. Il apparaît donc un risque d'accumulation dans l'air de radioéléments de la série des gaz rares produits par les réacteurs nucléaires, tel le Kr^{85} dont la période est de dix ans et demi.

Dans l'immense majorité des cas, cependant, les polluants atmosphériques ne séjournent pas *ad infinitum* dans la stratosphère ou la troposphère. Les substances gazeuses qui contaminent l'air sont souvent dissoutes dans l'eau ou adsorbées dans les sols. Elles sont ensuite transformées en d'autres composés par les plantes supérieures et surtout les micro-organismes. Tel est peut-être le cas du monoxyde de carbone qui est oxydé par diverses bactéries édaphiques. De même, l'anhydride sulfureux est transformé en sulfates, son soufre finalement incorporé à des amino-acides comme la méthionine ou la cystéine par les végétaux autotrophes (cf. p. 15 et p. 59).

Les particules solides sont toutes ramenées à la surface du globe après un temps variable de séjour dans l'atmosphère, soit par entraînement physique, soit par dissolution dans l'eau, lors des précipitations. Celles-ci provoquent leur chute directement dans les océans ou sur les terres émergées. Dans cette dernière éventualité, les phénomènes de lessivage des sols par les eaux continentales les amèneront — tout au moins pour une partie d'entre elles — en milieu marin où les courants achèveront de les disperser dans l'ensemble de l'hydrosphère.

Incorporation des polluants à la biomasse

Mais la répartition et la dispersion des diverses substances polluantes dans l'ensemble de la biosphère ne sont pas seulement conditionnées — il s'en faut même de beaucoup — par les seuls facteurs abiotiques qui régissent la circulation atmosphérique et celle des eaux dans les sols et l'hydrosphère. Toute substance qui contamine le milieu naturel peut être incorporée par les êtres vivants, grâce aux multiples processus métaboliques. Elle va de la sorte pénétrer dans les réseaux trophiques des écosystèmes, s'intégrer au cycle de la matière dans les biocœnoses et exercer une action néfaste sur d'innombrables espèces végétales et animales.

BANARAS HINDU UNIVERSITY CENTRAL LIBRARY

La dilution des agents polluants dans l'air ou les eaux, sur laquelle notre civilisation industrielle a trop longtemps compté pour atténuer leurs effets, apparaît en définitive comme un phénomène limité. C'est somme toute l'apanage d'un nombre restreint d'entre eux. De nombreuses recherches ont montré d'une part que les êtres vivants facilitent la dispersion des substances toxiques, accroissant ainsi l'étendue des zones contaminées et, d'autre part, qu'ils concentrent ces dernières dans leur organisme.

Ainsi, un poisson migrateur qui s'est contaminé avec un dérivé mercuriel dans une zone littorale pourra être la proie d'une autre espèce quand il sera parvenu dans les régions pélagiques les plus éloignées des côtes ([1]). Tel oiseau nicheur d'Europe occidentale, dont les tissus renferment de fortes concentrations d'insecticides organochlorés migrera dans des régions isolées d'Afrique centrale où est située son aire d'hivernage. Il y constituera un risque potentiel de contamination des chaînes trophiques de cet habitat.

(1) C'est la seule explication que l'on puisse donner à la haute teneur en mercure de bonites capturées par des pêcheurs japonais dans le Pacifique central.

EXISTENCE DE CONCENTREURS BIOLOGIQUES

Mais il y a pis encore — non seulement les organismes effectuent une dispersion active de nombreux polluants, mais encore la plupart d'entre eux peuvent les concentrer dans leurs tissus, ce qui accroît les risques toxicologiques. Il existe même dans la nature un ensemble d'espèces animales et végétales qui se comportent en véritables concentreurs biologiques. Ainsi, l'aptitude des *Fucus* et plus encore des laminaires à concentrer l'iode présent dans l'eau de mer est connue de longue date ; ces algues ont d'ailleurs été employées pour l'extraction industrielle de cet élément dilué à l'état de traces inutilisables dans le monde minéral. D'autre substances, encore plus rares dans l'hydrosphère, peuvent être absorbées et concentrées par certains animaux marins : le vanadium se rencontre à un taux assez élevé dans le sang des calmars ; l'hépato-pancréas de *Pecten* (coquille-St-Jacques) renferme 1/1000^e de cadmium (rapporté à son poids sec)!

Mais ce phénomène de concentration biologique n'est pas le seul fait de substances naturelles, il s'observe aussi avec de nombreux composés organiques de synthèse et bien d'autres substances artificiellement produites par l'homme. Dès 1954, Foster et Rostenbach relevaient dans le phytoplancton de la rivière Columbia des taux de radio-phosphore mille fois supérieurs à celui de ses eaux. Bryant et ses collaborateurs (1957) décelaient 0,111 $\mu\mu$c/gm de Sr^{90} dans le sol d'un pâturage britannique et 2,5 $\mu\mu$c/gm dans les graminées qui croissent sur ce dernier.

Robinson (1967) signale que la Dieldrine, un insecticide dilué à l'état de traces indosables dans les eaux de la mer du Nord, atteint une concentration de 1 ppb dans le phytoplancton (fig. 3.4). Hunt et Bishoff (1960) ont constaté que le phytoplancton d'un lac de Californie renfermait 5 ppm d'un insecticide voisin du DDT, le TDE, alors que sa concentration dans les eaux

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

n'était que de 0,014 ppm. Divers végétaux terrestres, comme la carotte, sont aussi capables de concentrer des substances minérales ou organiques présentes dans le sol, en particulier divers pesticides.

Ce pouvoir de concentration biologique est aussi particulièrement élevé chez certaines espèces animales. Les lombrics et autres oligochètes peuvent accumuler le DDT dans leur organisme à des taux plusieurs dizaines de fois supérieurs à celui auquel il est présent dans l'humus dont se nourrissent ces vers de terre (Dawey (1963). Parmi les invertébrés aquatiques, les mollusques bivalves peuvent atteindre des coefficients de concentration considérables. Ainsi, l'huitre *Crassostraea virginica* accumule le DDT dans son organisme à un taux 70 000 fois supérieur à celui de l'eau de mer dans laquelle vit cette espèce (Butler, 1965) !

ACCUMULATION DES POLLUANTS DANS LES CHAINES TROPHIQUES

En réalité, tous les êtres vivants présentent, certes à des degrés divers, cette propriété de pouvoir stocker dans leur organisme toute substance peu ou pas biodégradable. De ce fait, il apparaîtra des phénomènes d'amplification biologique de la pollution dans chaque écosystème contaminé. En effet, les organismes qui ont ainsi concentré telle substance toxique vont servir de nourriture à d'autres espèces animales qui l'accumuleront à leur tour dans leurs tissus. Le taux de concentration sera d'autant plus élevé que la substance sera moins rapidement métabolisable — toutes choses étant égales par ailleurs.

Il va se produire de la sorte, de proche en proche, une contamination de toutes les chaînes trophiques de l'écosystème, initiée par les producteurs primaires qui "pompent" le polluant dispersé dans le biotope. La concentration du toxique dans les êtres vivants s'élèvera à chaque niveau trophique et, dans tous les cas, ce seront les prédateurs situés à l'extrémité de la chaîne alimentaire qui présenteront les taux de contamination les plus élevés. La figure 3.4 et le tableau XXI illustrent ce phénomène de concentration biologique d'un polluant. Ils ont été établis d'après les travaux de Robinson (1967) sur la contamination de la Mer du Nord par un insecticide — la Dieldrine.

Si l'on examine la chaîne trophique suivante :

n.t. I		n.t. II		n.t. III		n.t. IV		n.t. V
Phytoplancton	→	zooplancton	→	crustacés et poissons microphages	→	poissons prédateurs	→	cormorans

Producteurs	→	herbivore	→	carnivores I	→	carnivores II	→	carnivores III

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

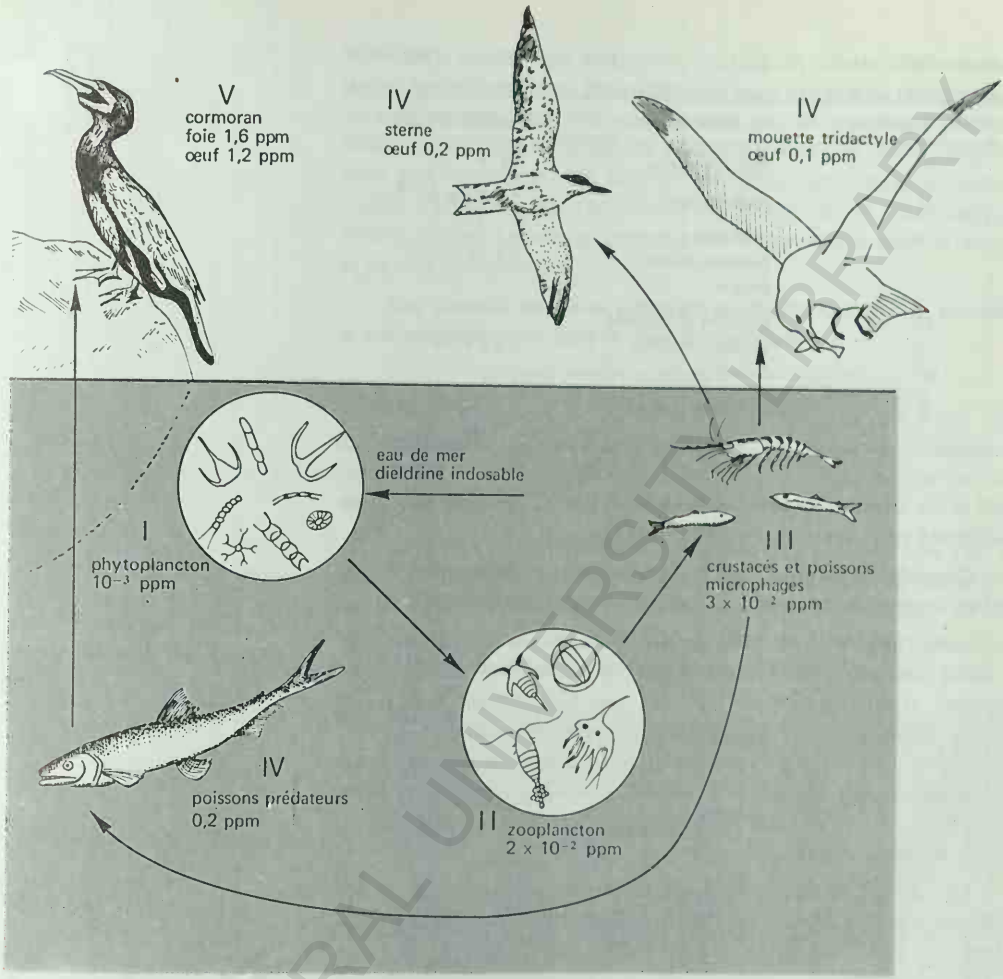


Figure 3.4

Schéma des mécanismes de concentration progressive d'un insecticide, la Dieldrine, par le jeu des chaînes alimentaires chez les organismes marins. Indosable dans l'eau de mer, la concentration de la Dieldrine s'accroît à mesure que l'on remonte la pyramide écologique dont les divers niveaux trophiques sont figurés en chiffres romains. Ainsi, sa teneur passe de 1 ppb (partie par milliard) dans le phytoplancton à une partie par million chez les cormorans. (In Ramade, Sci. Prog. – La Nature, Dunod ed., Decembre 1968, p. 444).

On constate que la Dieldrine, indosable dans l'eau de mer, atteint sa concentration maximale chez les cormorans (carnivores III) situés au cinquième niveau trophique. Ces oiseaux à régime strictement ichtyophage présentent dans leur foie un taux de Dieldrine 1 600 fois supérieur à celui observé dans le phytoplancton.

De tels phénomènes ont aussi été observés en milieu limnique. Dès 1960, Hunt et Bischoff ont montré que le TDE, insecticide voisin du DDT, se concentrait dans les chaînes trophiques du Clear Lake, en Californie. Alors que ce composé avait été dilué dans les eaux du lac, lors de traitements, à raison de 0,015 ppm, les auteurs en détectaient jusqu'à 2 500 ppm dans les tissus des grèbes peu

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XXI

Niveau trophique	*Organismes*	*Dieldrine (en ppm)*
I	phytoplancton	10^{-3}
II	zooplancton	1,5 à 2 x 10^{-2}
III	crustacés poissons micro-phages	3 x 10^{-2}
IV	poissons prédateurs sternes, mouette tridactyle	1 à 2 x 10^{-1}
V	cormoran huppé	1,2 (oeuf) 1,6 (foie)

plant le lac *(Aechmophorus occidentalis),* ce qui correspondait à un coefficient de concentration de 166 000 !

Cependant, ces processus d'accumulation de polluants dans les chaînes trophiques ne sont pas l'apanage des seuls pesticides.

Dans l'affaire de la Baie de Minamata, au Japon, qui entraîna la mort de plus de 110 personnes et l'invalidité de plusieurs centaines d'autres, c'est le mercure qui fut concentré dans les chaînes trophiques marines. Ui (1972), rapporte que cet élément, rejeté dans la mer par une usine chimique, atteignait dans les tissus des poissons dont se nourrissaient les pêcheurs victimes de cette catastrophe un taux 500 000 fois supérieur à celui que renfermaient les eaux de la baie.

La contamination des chaînes trophiques par les radionucléides fournit aussi une excellente illustration de tels phénomènes.

Les radiobiologistes ont souligné les risques très élevés auxquels les expérimentations atmosphériques d'engins nucléaires exposent les populations qui vivent sous de hautes latitudes.

Miettinen (1965) a étudié la contamination des Lapons par le Sr^{90} et le Cs^{137} . Il a pu montré que ces derniers étaient soumis à des doses d'irradiation 55 fois supérieures à celles que reçoivent les habitants d'Helsinki. Cet auteur a suivi le transfert de ces radioéléments dans la chaîne élémentaire :

Lichen (*Cladonia*) ⟶ rennes ⟶ Lapon

Producteur primaire ⟶ herbivores ⟶ carnivore

I II III

Miettinen a remarqué un fort coefficient d'accumulation du radiostrontium et du radiocésium dans les lichens. Cela provient non seulement de particularités liées à la physiologie de ces cryptogames, mais aussi de la nature même du sol des toundras. En effet, les sols boréaux, très pauvres en éléments minéraux nutritifs,

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

mobilisent rapidement strontium et césium, respectivement analogues au calcium et au potassium par leurs propriétés chimiques et qui, de ce fait, sont très vite absorbés par les plantes. Ainsi, leur taux dans les lichens se trouve plusieurs milliers de fois supérieur à celui que renferment les sols de toundras. Une nouvelle concentration s'effectue dans l'organisme des rennes, qui se nourrissent de lichens, et les Lapons se contaminent en se nourrissant de viande et de lait de rennes.

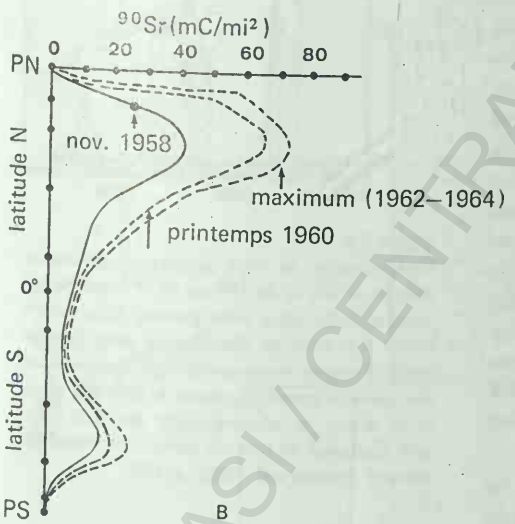
Les travaux similaires effectués en Alaska ont mis en évidence le même phénomène dans la chaîne trophique :

Lichen ⟶ caribou ⟶ Esquimau.

Dans l'herbivore, la concentration en radiocesium était trois fois supérieure à celle des lichens et les tissus de l'Esquimau (carnivore) en renfermaient deux fois plus que la viande de caribou dont il se nourrit.

La contamination des sols cultivés et des pâturages par les retombées radioactives (1) fournit aussi une excellente illustration de la manière par laquelle les dangereux radionucléides qu'elles renferment sont concentrés dans les diverses chaînes trophiques à l'extrémité desquelles se trouve l'homme. Bryant et ses collaborateurs

(1) Rappelons qu'une explosion d'une mégatonne libère 160 000 curies de Cs^{137} et 100 000 curies de Sr^{90}, auxquels il convient d'ajouter (entre autres) une quantité significative d'I^{131}, de Ba^{140}, de C^{14}, etc.



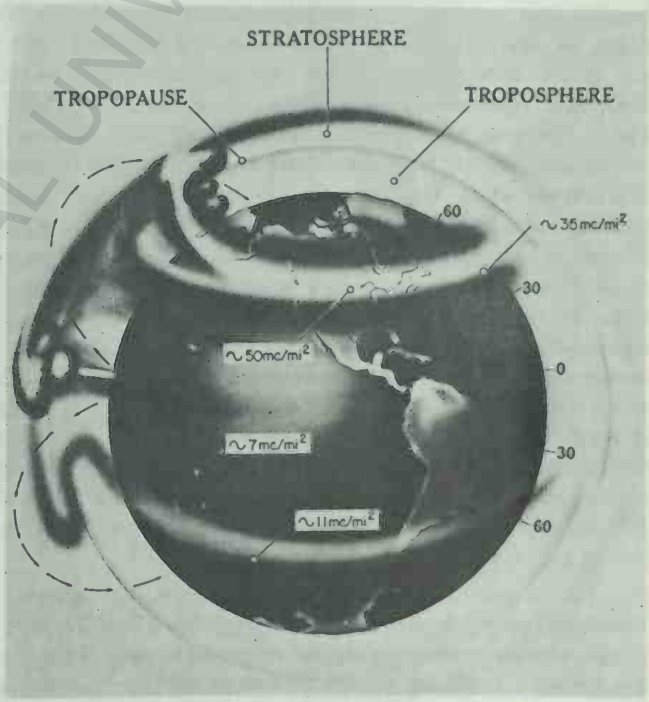


Figure 3.5

Contamination de l'atmosphère et mécanismes de transport des retombées radioactives à la suite des expériences nucléaires américaines et soviétiques effectuées au cours des années 50. Les chiffres représentent les quantités de Sr 90 déposées au niveau du sol exprimées en millicuries par Mile carré (~ 2,6 km²) en Novembre 1958. La figure B représente les variations prévues et observées en 1960 pour l'importance des retombées selon la latitude. D'après Langham in Fowler, "Radioactive fallout", Elsevier ed., 1965, p. 8 et 9.

BIBLIASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

(1957) ont pu relever les concentrations suivantes en radiostrontium dans divers pâturages de Grande-Bretagne (Tableau XXII), à la suite des retombées dues aux expériences nucléaires dans l'atmosphère (fig. 3.5).

Tableau XXII

Chaîne trophique	Sr^{90} en $\mu\mu C/gm$	*Taux de concentration*
Sol	0,112	1
Plante fourragère	2,5	21
Mouton	80	714

Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que la teneur des aliments consommés par l'homme en Sr^{90}, Cs^{137}, I^{131}, etc. présente des valeurs en étroite corrélation avec l'époque et le nombre d'essais d'engins nucléaires dans l'atmosphère, ainsi qu'en atteste la figure 3.6.

En conclusion, la circulation des polluants dans la biosphère nous montre combien la contamination de celle-ci par n'importe quelle substance minérale ou organique ne doit être considérée en aucun cas comme un phénomène ponctuel. Malgré la vitesse à laquelle tout agent toxique est dispersé dans l'ensemble de l'écosphère, sa répartition sera loin d'être uniforme entre et à l'intérieur des divers milieux. Il apparaît, en particulier, que les fonds océaniques représentent le lieu ultime d'accumulation de bien des agents polluants. C'est par exemple le cas du DDT comme l'ont récemment montré Woodwell, Craig et Jonhson (1971). Certains écosystèmes et, à l'intérieur de ces derniers certains habitats, peuvent donc être plus menacés que d'autres. Mais, en outre, se produisent des phénomènes de concentration biologique des substances libérées par l'homme dans le milieu naturel. On observe un effet de focalisation de la pollution à l'intérieur des chaînes alimentaires qui ramène les substances toxiques, peu ou pas biodégradables dispersées dans la biosphère, vers les organismes situés aux niveaux trophiques les plus élevés — carnivores primaires et super-prédateurs ([1]). Si l'on figure, sous l'aspect d'une pyramide écologique, le taux auquel chaque polluant contamine les espèces situées aux divers niveaux trophiques dans une biocœnose (Fig. 3.7), on constate que celle-ci présente un aspect exactement inversé par rapport à la pyramide des biomasses.

Par la pollution de l'écosphère l'homme, qui occupe — ne l'oublions pas — la place d'un super-prédateur par rapport aux autres espèces vivantes, s'expose en quelque sorte à un "effet-boomerang". Aussi, les simples normes de dilution "inerte" par le seul jeu des facteurs physico-chimiques, — telles qu'elles ont été définies dans la plupart des règlementations sur la pollution par des "experts", trop souvent au mépris des enseignements les plus élémentaires de l'écologie, constituent-elles aujourd'hui une aberration inadmissible.

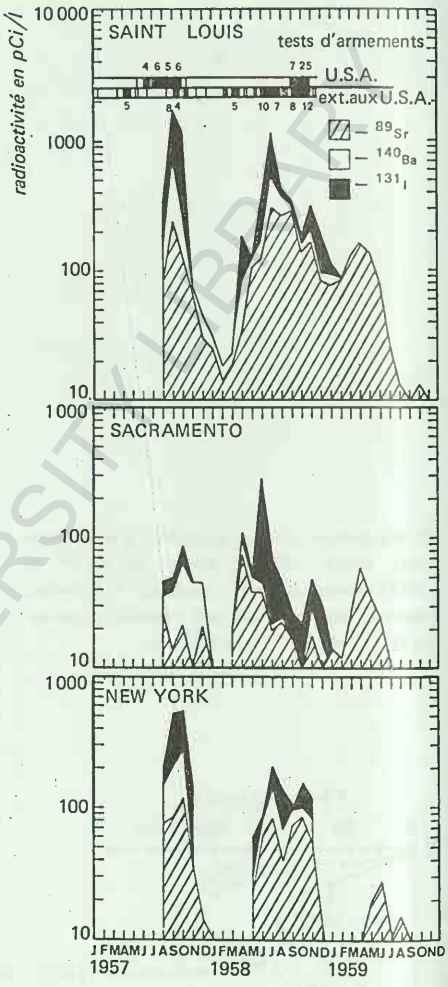
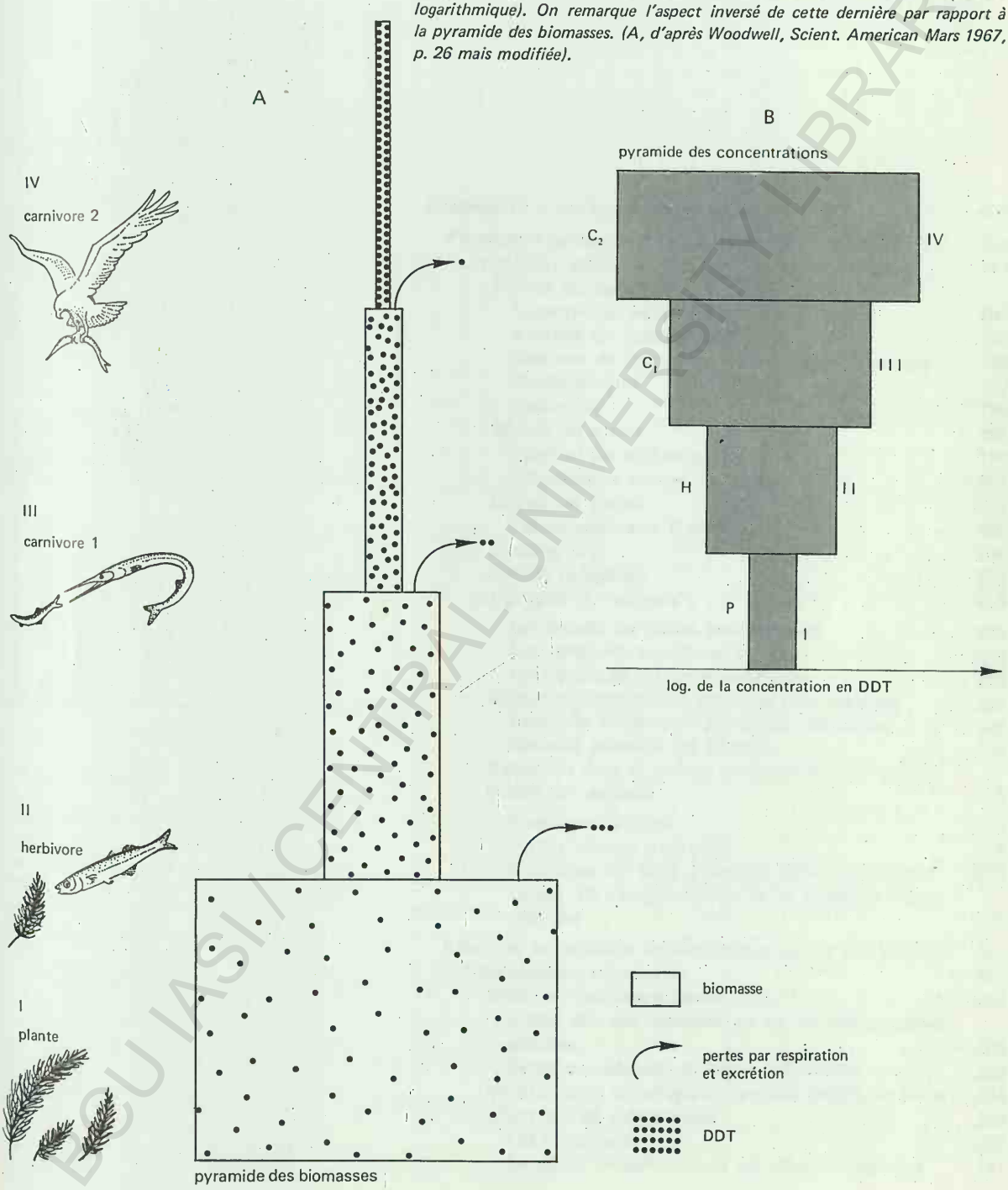


Figure 3.6
Concentration de trois dangereux radionucléides, le Sr^{90}, le Ba^{140} et l'I^{131} dans le lait commercialisé dans trois grandes villes américaines à la suite de divers essais dans l'atmosphère d'engins thermonucléaires. On remarque une parfaite corrélation entre la date des essais et le niveau de contamination des laits. D'après Campbell et coll. in *Fowler "Radioactive fallout" Elsevier ed., 1965, p. 163.*

(1) On désigne sous ce terme les carnivores secondaires et d'ordre supérieur

UNIVERSITY LIBRARY

Figure 3.7
Processus de concentration du DDT dans une chaîne trophique. En A est figurée la pyramide des biomasses avec la concentration du DDT symbolisée par des points noirs, en B, la pyramide des concentrations de cet insecticide (échelle logarithmique). On remarque l'aspect inversé de cette dernière par rapport à la pyramide des biomasses. (A, d'après Woodwell, Scient. American Mars 1967, p. 26 mais modifiée).



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE IV

Chapitre IV — Pollution atmosphérique 187

Principaux polluants atmosphériques 188
Principaux polluants gazeux 191
Dérivés du carbone
L'anhydride ou gaz carbonique (CO_2) 191
L'oxyde de carbone (CO) 193
Destinée de l'oxyde de carbone atmosphérique 195
Hydrocarbures 197
Aldéhydes 198
Dérivés du soufre 198
L'anhydride sulfureux (SO_2) 198
L'hydrogène sulfuré (SH_2) 201
Dérivés de l'azote 202
Pero-acyl-nitrates (PAN) 205
L'ozone (O_3) 206
Dérivés halogènes 207
Les poussières "aérosols" 208
Les grosses particules sédimentaires 209
Les particules semi-fines 209
Les particules inframicroscopiques 209
Origine et constitution chimique des "aérosols" 209
Particules émises par des sources naturelles 209
Aérosols produits par l'homme 210
Variations dans la teneur atmosphérique et la distribution des aérosols 213
Plomb particulaire 213
Autres sources d'aérosols 214
Croissance du taux d'aérosols dans l'atmosphère 217
Causes de l'augmentation de la turbidité atmosphérique 219

Effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes 221
Conséquences climatiques 221
Effets sur les macroclimats 222
Effets du gaz carbonique sur les températures globales 226
Effets des aérosols d'origine industrielle 230
Modifications climatiques observées depuis un siècle 234
Effets sur les mésoclimats 238
Les brouillards 239
Le dôme de pollution et ses effets climatiques 241

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Pollution atmosphérique et cycles biogéochimiques 244
Perturbation du cycle du carbone 245
Perturbation du cycle de l'oxygène 252
Perturbation du cycle de l'azote 254
Perturbation du cycle du soufre 254

Conséquences de la pollution atmosphérique pour les espèces et les biocœnoses 257
Effets sur les espèces végétales et les phytocœnoses 257
Effets de l'anhydride sulfureux sur les phanérogames 257
Effets sur les cryptogames 258
Mode d'action du gaz sulfureux 261
Composés nitrés 264
Effets de la pollution atmosphérique sur les animaux et l'homme 262

IAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

IV
POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Le rejet intempestif de substances diverses dans l'atmosphère constitue sans aucun doute la plus évidente des dégradations de l'environnement par l'homme.

Quoique remontant à l'aube de la civilisation industrielle, la pollution atmosphérique s'est accrue dans des proportions considérables au cours de la dernière décennie dans l'ensemble des pays développés. L'augmentation de la production industrielle et de la circulation des véhicules à moteur s'accompagne du dégagement dans l'air de quantités croissantes de fumées, de gaz toxiques et autres agents polluants.

Cet accroissement de la pollution atmosphérique est fort significatif dans les régions reculées, à l'écart de tout foyer de peuplement humain, ce qui atteste de l'aspect global du phénomène. Ainsi, au Parc National du Yellowstone, qui possède l'air le plus pur de tous les Etats-Unis, le nombre moyen de particules insédimentables en suspension dans l'atmosphère s'est accru de dix fois en cinq ans, passant de 100 à 800-1 000/cm^3 à la fin des années 60 (Schaeffer, 1970).

La quantité de poussières qui se déposent sur les hauts sommets du Caucase s'est élevée de vingt fois entre 1930 et 1960, phénomène que Bryson et Wendland (1970) mettent en corrélation avec l'expansion considérable de l'industrie soviétique pendant cette même période.

Il serait vain de tenter d'attribuer cette croissance de la pollution atmosphérique à un type particulier d'activité industrielle, à une technologie moderne déterminée. C'est en fait la résultante de multiples facteurs qui caractérisent la civilisation moderne : accroissement de la production d'énergie, de l'industrie métallurgique, de la circulation routière et aérienne, des tonnages d'ordures incinérées, etc., lesquels interviennent tous de façon significative dans ce phénomène.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'origine des principales substances qui contaminent l'atmosphère est des plus variées. L'utilisation des combustibles fossiles comme source d'énergie constitue sans aucun doute une cause primordiale de pollution de l'air. Il existe cependant d'autres sources de contamination de la biosphère : rejet de sous-produits gazeux par l'industrie chimique, de poussières par certaines installations métallurgiques, par les cimenteries et bien d'autres activités industrielles... Par ailleurs, il se produit une contamination de l'atmosphère par des radionucléides gazeux (rejets de centrales nucléaires) et des particules radioactives (expérimentation d'armes nucléaires). Enfin, des fermentations de matières organiques peuvent dégager des gaz riches en hydrogène sulfuré et autres composés soufrés.

La pollution atmosphérique sévit surtout en milieu urbain, non seulement à cause de la concentration des industries et des foyers domestiques, mais aussi par suite de la circulation des véhicules à moteur à combustion interne — ainsi, aux Etats-Unis, 93 % des automobiles appartiennent à des citadins ! Il existe toutefois des sources de pollution sises à l'écart des grandes villes, voire en plein milieu rural. Celles-ci proviennent certes de l'usage de divers produits chimiques pour l'agriculture, mais aussi de certaines implantations industrielles. En France, des exemples de pollution dans la vallée de la Maurienne par diverses installations électrochimiques, dans le Sud-Ouest par l'usine de traitement du gaz de Lacq et, plus récemment, les graves problèmes d'environnement soulevés par l'édification du complexe pétrochimique et métallurgique du Golfe de Fos, illustrent bien l'importance que peut prendre la pollution atmosphérique en des lieux éloignés des grandes agglomérations.

PRINCIPAUX POLLUANTS ATMOSPHERIQUES

L'atmosphère actuelle résulte en définitive de l'action continue des êtres vivants depuis les débuts des temps géologiques. Malgré la constance de sa composition celle-ci reflète non pas un état aujourd'hui statique, mais au contraire un équilibre dynamique dû à l'action antagoniste des organismes autotrophes et hétérotrophes et de divers phénomènes géochimiques. L'air pur homogène n'existe donc pas, puisque des échanges s'effectuent en permanence entre les êtres vivants, l'hydrosphère, l'atmosphère et les couches profondes de la lithosphère (volcanisme).

La masse totale de l'atmosphère est de $5{,}2 \times 10^{19}$ tonnes. Les $9/10^{e}$ de celle-ci sont situés au-dessous de 16 km d'altitude, c'est-à-dire dans la troposphère, alors que les couches supérieures, au-delà de 48 km d'altitude, ne représentent que le millième de cette masse.

BUNDESZENTRALBIBLIOTHEK LIBRARY

Le tableau XXIII nous donne la composition moyenne de l'air sec (selon Valley M.G., 1965).

Tableau XXIII – Composition de l'air sec(*)

Constituant	*% en volume*	*% en masse*
Azote	70,01	75,53
Oxygène	20,95	23,14
Argon	0,93	1,28
Anhydride carbonique	0,032	0,046
Néon	$1{,}8 \times 10^{-3}$	$1{,}25 \times 10^{-3}$
Hélium	$5{,}24 \times 10^{-4}$	$7{,}24 \times 10^{-5}$
Méthane	$1{,}4 \times 10^{-4}$	$7{,}75 \times 10^{-5}$
Krypton	$1{,}14 \times 10^{-4}$	$3{,}3 \times 10^{-4}$
Protoxyde d'azote	5×10^{-5}	$7{,}6 \times 10^{-5}$

* D'après *Handbook of Geophysics*, McGraw-Hill ed. (1965).

De plus, l'air renferme normalement à côté de ces principaux gaz, des traces égales ou inférieures à une partie par million d'hydrogène, de peroxyde d'azote, d'ozone, d'anhydride sulfureux, d'oxyde de carbone, d'ammoniac, de xénon, etc.

La répartition en altitude des divers gaz n'est pas toujours homogène ; ainsi que nous en avons l'exemple dans le cas de l'ozone.

La pollution atmosphérique peut résulter soit d'une modification quantitative, par hausse de la concentration dans l'air de certains de ses constituants normaux (gaz carbonique, peroxyde d'azote, ozone, par exemple), soit d'une modification qualitative due à l'introduction de composés étrangers à ce milieu (radioéléments, substances organiques de synthèse par exemple), soit encore – et c'est le cas général – d'une conjugaison de ces deux phénomènes ([1]).

Souvent fort apparente, même pour le moins averti des observateurs, la pollution atmosphérique est cependant difficile à analyser car les niveaux du taux des principaux agents polluants varient beaucoup selon les conditions météorologiques et topographiques (nature du relief). De plus, le problème est compliqué par le fait que de nombreuses substances peuvent réagir entre elles, même à très grande dilution, pour donner de nouveaux composés très toxiques. Ainsi, l'anhydride sulfureux s'oxyde dans l'air en SO_3 qui réagit avec la vapeur d'eau et produit de l'acide sulfurique. De même, la réaction des oxydes d'azote avec les hydrocarbures imbrûlés, rejetés dans l'atmosphère par les échappements des moteurs à explosion, produit des peroxy-acyl-nitrates (PAN), beaucoup plus nocifs que les polluants initiaux dont ils proviennent.

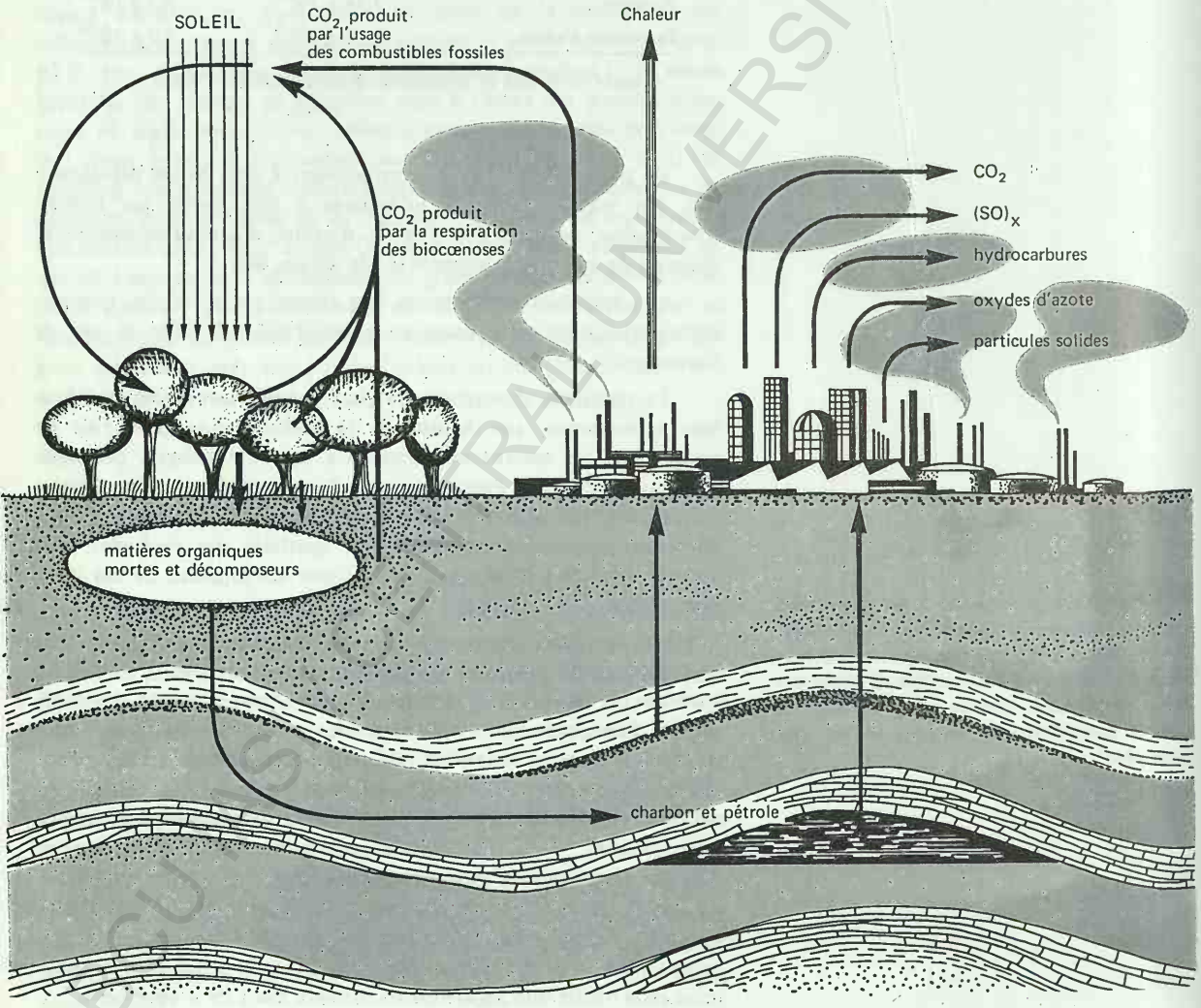
(1) Le Conseil de l'Europe a défini en 1967 comme polluant atmosphérique *"toute substance étrangère ou dont la variation du taux dans l'atmosphère est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer une gêne"*.

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les principales substances polluant l'atmosphère peuvent se répartir de façon sommaire en deux groupes principaux : gaz et particules solides (plus rarement liquides), dénommées à tort "aérosols". Les gaz représentent 90 % de la masse totale émise dans l'atmosphère et les particules solides correspondent aux 10 % restants (d'après Varney et Mac Cormac, 1971).

L'origine des principales substances qui contaminent l'air est des plus variées ainsi que nous l'avons vu dans ce qui précède. Le tableau XXIV, donne une répartition de leurs principales sources d'émission. La combustion des diverses formes du carbone fossile (charbon, pétrole) joue un rôle prépondérant dans cette contamination (Fig. 4.1).

Figure 4.1
Interférences entre la pollution atmosphérique et le cycle des principaux éléments biogènes. L'usage des combustibles fossiles constitue la principale cause de pollution atmosphérique. Celle-ci se traduit par l'émission de contaminants artificiels (particules solides) ainsi que de divers dérivés du carbone, de l'azote et du soufre, qui interfèrent avec les cycles de ces éléments. Sur ce schéma est figurée à gauche l'incorporation du CO_2 produit par les combustions dans le cycle du carbone. D'après Singer in *Scientif. American, sept. 1970, p. 136, mais modifié*



BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XXIV – Nature et origine des principaux groupes de substances polluant l'atmosphère

	Nature du polluant	*Source d'émission*
Gaz	Anhydride carbonique	Volcanisme Respiration des êtres vivants Combustibles fossiles
	Oxyde de carbone	Volcanisme Moteurs à explosion
	Hydrocarbures	Plantes, Bactéries Moteurs à explosion
	Composés organiques	Industries chimiques Incinération d'ordures Combustions diverses
	Anhydride sulfureux et autres dérivés soufrés	Volcanisme Embruns marins Bactéries Combustibles fossiles
	Dérivés nitrés	Bactéries Combustions
	Radionucléides	Centrales atomiques Explosions nucléaires
Particules	Métaux lourds Composés minéraux	Volcanisme – Météorites Erosion éolienne – Embruns Industries diverses Moteurs à explosion
	Composés organiques naturels ou de synthèse	Incendies de forêts Industries chimiques Combustions diverses Incinération d'ordures Agriculture (pesticides)
	Radionucléides	Explosions nucléaires

Principaux polluants gazeux

DERIVES DU CARBONE

L'anhydride ou gaz carbonique (CO_2)

C'est un constituant normal de l'atmosphère. Il s'y rencontre aujourd'hui à raison de 325 ppm. Cependant, son taux n'est pas stable mais augmente sans cesse depuis la fin du siècle dernier. Cela résulte de la croissance ininterrompue des quantités de combustibles fossiles que brûle la civilisation industrielle, afin de produire l'énergie dont elle a besoin. Cette consommation s'effectue de nos jours à un rythme si rapide qu'en quelques siècles – selon les prévisions les moins pessimistes – l'homme aura utilisé la totalité des masses de matières carbonées qui s'étaient accumulées dans diverses formations géologiques pendant plus d'un demi-milliard

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

d'années ! Faut-il rappeler qu'en 1971, la quantité totale d'énergie produite dans le monde a dépassé 7×10^9 tonnes d'équivalent-charbon (Grenon, 1972), dont plus des $9/10^e$ provenaient de l'emploi des combustibles fossiles ? ([1]).

Comme 12 g de carbone donnent par combustion 48 g d'anhydride carbonique, on concevra aisément que les quantités de gaz carbonique produites par l'oxydation de telles masses de charbon et d'hydrocarbures soient considérables. On évalue à 15,4 milliards de tonnes la masse totale de gaz carbonique dégagée dans l'atmosphère en 1970 par la civilisation industrielle. Cette valeur imputable à l'activité humaine est à rapprocher des $7{,}2 \times 10^{10}$ tonnes de ce gaz produites par la respiration de l'ensemble des êtres vivants (selon Robinson et Robbins, 1968), ou des 11×10^{10} tonnes absorbées chaque année par l'ensemble des producteurs primaires de la biosphère (photosynthèse).

Si nous prenons maintenant en considération la quantité totale de gaz carbonique présente dans l'atmosphère, soit $2{,}25 \times 10^{12}$ tonnes (Johnson, 1970) ([2]), nous voyons que les volumes dégagés en 1970 par les combustions devraient se traduire par une augmentation de l'ordre de 2 ppm par an. Ce n'est pas du tout ce que l'on observe car, si l'on tient compte de la quantité totale d'anhydride carbonique dégagée par les combustions et de l'accroissement moyen annuel de la teneur atmosphérique en ce gaz

(1) Plus exactement, 98 % environ de l'énergie mondiale, les 2 % restants sont produits par l'hydro-électricité, le nucléaire n'intervenant que pour une fraction négligeable dans ce total.

(2) Le groupe SCEP qui a élaboré le rapport du MIT, *Man's impact on the global environment,* cite une valeur de $2{,}5 \times 10^{11}$ tonnes pour le contenu total en gaz carbonique de l'atmosphère soit $6{,}8 \times 10^{11}$ tonnes de carbone. Bolin (1970) évalue à 7×10^{11} tonnes la masse totale de carbone atmosphérique en 1967 ($2{,}8 \times 10^{12}$ tonnes de gaz carbonique).

Tableau XXV — Production de gaz carbonique par combustion de charbon et divers hydrocarbures fossiles entre 1950 et 1967 (*) (en milliards de tonnes)

Année	*Charbon*	*Lignite*	*Pétrole*	*Gaz naturel*	*Total*
1950	3,7	0,9	1,4	0,4	6,4
1951	3,8	0,9	1,7	0,5	6,9
1952	3,8	0,9	1,8	0,5	7,0
1953	3,8	0,9	1,9	0,5	7,1
1954	3,8	0,9	2,0	0,6	7,3
1955	4,1	1,0	2,2	0,6	7,9
1956	4,4	1,1	2,4	0,7	8,6
1957	4,5	1,3	2,5	0,7	9,0
1958	4,6	1,4	2,6	0,8	9,4
1959	4,8	1,4	2,8	0,9	9,9
1960	5,0	1,4	3,1	1,0	10,5
1961	4,5	1,5	3,3	1,0	10,3
1962	4,6	1,5	3,5	1,1	10,7
1963	4,8	1,6	3,8	1,2	11,4
1964	5,0	1,7	4,2	1,3	12,2
1965	5,0	1,7	4,5	1,5	12,7
1966	5,1	1,7	4,8	1,6	13,2
1967	4,8	1,7	5,2	1,7	13,4
1980	11,1		10,8	4,0	26,0

* D'après *Man's Impact on the global environment,* MIT Press, Cambridge, (1970).

SCIAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

(0,7 ppm/an au cours des dernières décennies), on constate que seulement le tiers de la quantité produite est restée dans l'air. Le reste a donc dû être absorbé selon toute apparence, par d'autres milieux biosphériques.

En définitive, l'emploi sans cesse accru de combustibles fossiles par la société industrielle depuis plus d'un siècle a perturbé le cycle biogéochimique du carbone. L'homme a rompu l'état d'équilibre dynamique qui s'était établi entre les quantités de gaz carbonique dégagées dans l'atmosphère par les diverses sources de ce gaz (respiration, fermentation, volcanisme), et celles absorbées, extraites de l'atmosphère par la photosynthèse des autotrophes et la sédimentation. Ainsi, les facteurs homéostatiques qui assuraient la constance du taux de gaz carbonique dans l'air n'interviennent plus de façon efficace et l'on assiste à un accroissement de la concentration atmosphérique de ce gaz, qui est passée de 290 ppm vers 1880 à 323 ppm aujourd'hui.

L'augmentation moyenne du taux de gaz carbonique dans l'air a été évaluée entre 1958 et 1964 à 0,7 ppm/an ou 0,2 %/an (en volume). Ceci donne un accroissement de 2 % par décennie, soit un temps de doublement de 23 ans pour la quantité introduite par l'homme dans l'atmosphère. Cette croissance s'effectue de nos jours à un rythme identique.

La perturbation ainsi introduite par l'homme dans le cycle du carbone dans la biosphère est un phénomène écologique très important dont nous étudierons plus loin en détail les conséquences prévisibles (cf. p. 200 et p. 219).

L'oxyde de carbone (CO)

Encore dénommé monoxyde de carbone, c'est le plus abondant et le plus largement répandu de tous les polluants atmosphériques.

Dans des conditions naturelles, il se rencontre dans l'air à des taux très réduits, évalués en moyenne à 0,1-0,2 ppm.

Junge (1971) suggère une concentration moyenne de 0,12 ppm d'oxyde de carbone dans l'ensemble de la troposphère.

Dans les zones les plus reculées de l'hémisphère Nord, Robbins et coll. (1968) en ont détecté 0,025 ppm. En Alaska, Cavenagh et coll. (1969) signalent entre 0,055 et 0,260 ppm. Robinson et Robbins citent aussi 0,06 ppm dans le Pacifique Sud.

L'inventaire des diverses sources naturelles d'oxyde de carbone ne semble pas achevé et l'estimation des quantités de ce gaz produites par les agents biogéochimiques demeure aujourd'hui encore incertaine.

Le volcanisme, certaines fermentations en milieu anaérobie (vases benthiques dans les marécages), les décharges électriques dans la troposphère, les incendies de forêts, feux de brousse (qui sont souvent le fait de l'homme mais sont parfois spontanés), représentent les principales sources d'oxyde de carbone.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Cependant, les êtres vivants marins semblent intervenir de façon significative dans la production naturelle d'oxyde de carbone. Ce gaz peut, en effet, être élaboré par des algues brunes ou des fucus. Ainsi, ceux du genre *Neocystis* en renferment plus de 800 ppm dans leurs flotteurs. Wittenberg (1960), Barham et Wilton (1964) ont aussi montré que le gaz contenu à l'intérieur des pneumatophores de *Physalia physalis* et de divers siphonophores en renferme aussi des taux significatifs ([1]).

Jaffe (1970) considère que ces diverses sources biologiques d'oxyde de carbone sont la cause essentielle de la présence de ce gaz à l'état de saturation dans les eaux océaniques. Swinnerton et coll. (1970) ont d'ailleurs émis l'hypothèse que l'océan serait la principale source naturelle d'oxyde de carbone. Il produirait, selon ces auteurs, 9×10^6 t/an de ce gaz, quantité qu'ils estiment représenter environ 5 % de la production d'oxyde de carbone par les diverses sources technologiques.

Swinnerton et ses collègues ont aussi montré, lors de leurs croisières océanographiques, l'existence de variations diverses de la concentration en oxyde de carbone dans les couches superficielles des mers, qui ne pourraient être logiquement expliquées que si les eaux de la surface océanique agissaient comme source de ce gaz, lequel est en état de sursaturation dans celles-ci à un taux dépassant en moyenne dix fois la concentration d'équilibre. Cependant, l'existence probable d'autres phénomènes naturels produisant de l'oxyde de carbone a été récemment envisagée. Il a été suggéré que le dégagement de terpènes volatils par les végétaux, et l'oxydation de ces derniers dans l'atmosphère pourraient produire quelque 61×10^6 t d'oxyde de carbone par an. Par ailleurs, Weinstock et Niki (1972) ont émis l'hypothèse que des quantités considérables de ce gaz se formeraient dans la stratosphère. Le ^{14}C formé par les rayons cosmiques serait d'abord fixé en oxyde de carbone avant d'être converti en gaz carbonique, en présence d'ions OH — formés par photodissociation de l'eau. Ces auteurs envisagent aussi l'élaboration d'oxyde de carbone dans la haute atmosphère selon la réaction $OH^- + CH_4 \longrightarrow CH_3^+ + H_2O$ avec transformation ultérieure du CH_3 en oxyde de carbone. Weinstock et Niki estiment que la quantité d'oxyde de carbone formée par ces divers processus géochimiques serait quinze fois supérieure à la quantité totale produite par les combustions.

Malgré ces dernières hypothèses élaborées à partir de considérations théoriques sur la physique de la haute atmosphère, la plupart des spécialistes actuels attribuent aux combustions — dans la limite des connaissances actuelles — un rôle prédominant dans la contamination de l'air par l'oxyde de carbone.

Le moteur à essence représente la principale source d'émanation de ce gaz : pour les seuls Etats-Unis, on évalue à 102×10^6 t/an les quantités rejetées chaque année dans l'atmosphère par les automobiles. L'émission maximale d'oxyde de carbone s'effectue lorsque le moteur est froid (starter) ou fonctionne

(1) Ces animaux sont les cnidaires coloniaux du groupe des méduses qui flottent à la surface de l'océan grâce à leur pneumatophore ; celui-ci renferme un gaz, riche en oxyde de carbone, qui est sécrété par le tissu épithélial tapissant la paroi interne de cet organe.

SOUTHAMPTON UNIVERSITY LIBRARY

avec un mélange trop riche. On estime que 80 % de la quantité totale d'oxyde de carbone produite par un véhicule au cours d'un parcours de 23 minutes sont émis pendant les deux premières minutes suivant sa mise en route. Ce gaz peut représenter jusqu'à 11 % des gaz d'échappement des automobiles.

Les autres sources sont constituées par l'utilisation du bois comme combustible, la combustion du charbon et les incendies de forêts qui affectent chaque année dans le monde quelque $7{,}2 \times 10^6$ hectares (Tableau XXVI).

Tableau XXVI – Estimation à l'échelle biosphérique des sources d'émission artificielle d'oxyde de carbone en 1968 (selon Robinson et Robbins, 1970)

Source	*Consommation en tonnes par an*	*Emission de* CO *en tonnes par an*
Essence	379×10^6	193×10^6
Charbon	3074×10^6	12×10^6
Bois (combustible)	466×10^6	16×10^6
Incinération de déchets	500×10^6	25×10^6
Incendies de forêts	7×10^6 *	11×10^6
Total		257×10^6

* Surface brûlée chaque année en millions d'hectares.

La concentration atmosphérique du monoxyde de carbone varie beaucoup dans les basses couches de la troposphère selon la localisation géographique.

En zone urbaine, la teneur mesurée oscille entre 1 ppm et 140 ppm (1970), valeurs à rapprocher des concentrations normales en des lieux non pollués (0,06 ppm dans l'hémisphère Sud et 0,2 ppm dans l'hémisphère Nord).

La concentration moyenne dans les grandes villes est estimée, au niveau du sol, à une vingtaine de ppm. A Paris, elle a oscillé entre 17 et 21 ppm au début des années 60 (Ternisien, 1968). Toutefois, comme ce gaz diffuse facilement dans l'atmosphère, sa concentration est déjà beaucoup plus faible au niveau du deuxième étage d'un immeuble. Cependant, des concentrations nocives sont souvent atteintes dans les carrefours urbains aux heures d'affluence, où des concentrations de plus de 100 ppm peuvent être observées lors d'embouteillage. On a même signalé jusqu'à 295 ppm dans un tunnel londonien au moment des pointes de circulation.

Destinée de l'oxyde de carbone atmosphérique

On a calculé que la seule libération de 250×10^6 t/an de ce gaz devrait se traduire par un accroissement annuel de 0,04 ppm pour sa concentration dans l'air. En l'absence de phénomènes

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

antagonistes extrayant l'oxyde de carbone de l'atmosphère, on a aussi pu calculer que la teneur moyenne dans cette dernière devrait être aujourd'hui nettement supérieure à 1 ppm.

Malgré les grandes incertitudes qui règnent sur son temps moyen de séjour dans la troposphère (de 0,1 à 5 ans selon les auteurs), on doit donc convenir qu'il existe des processus biogéochimiques qui dégradent ce gaz, ou le transforment en d'autres composés.

L'oxydation de l'oxyde de carbone en gaz carbonique dans la haute atmosphère ne peut avoir lieu qu'au-dessus de 100 km d'altitude et ne joue donc aucun rôle significatif.

Weinstock et Niki considèrent que la réaction :

$$CO + OH \longrightarrow CO_2 + H^+$$

interviendrait de façon prépondérante dans le cycle de l'oxyde de carbone atmosphérique.

Cependant, le rôle des êtres vivants dans l'extraction de ce gaz semble être le facteur le plus important dans le maintien de la constance de sa concentration moyenne dans l'atmosphère. Inman et coll. (1971) ont pu montrer que diverses bactéries du sol absorbent efficacement l'oxyde de carbone et le transforment en gaz carbonique et (ou) en méthane :

Bacillus oligocarbophilus, bactérie aérobie, et *Clostridium Welchii* l'utilisent comme source de carbone en l'oxydant en gaz carbonique.

Methanosarcina barkerii et *Bacterium formicum* le transforment soit en méthane, soit en gaz carbonique selon qu'elles disposent ou non d'un donneur d'hydrogène. Inman et coll. ont pu ainsi évaluer entre 2 et 17 mg/h/m^3 de sol la conversion de l'oxyde de carbone en d'autres composés, selon l'espèce de microorganismes, lorsque ces derniers sont placés en présence d'une atmosphère renfermant 80 ppm de ce gaz. Ces auteurs concluent que la flore bactérienne des sols constitue un élément essentiel du cycle de l'oxyde de carbone.

La respiration végétale pourrait aussi constituer un processus potentiel important d'élimination de l'oxyde de carbone atmosphérique. Inoffensif pour les végétaux aux concentrations ordinaires, il interfère cependant avec le métabolisme azoté et présente une nette phytotoxicité à des taux plus élevés. En particulier, il inhibe les processus respiratoires.

La réaction de l'oxyde de carbone avec les porphyrines végétales a aussi été évoquée mais on ignore s'il est transformé par la suite en gaz carbonique, phénomène indispensable pour que les plantes puissent extraire de façon continue l'oxyde de carbone de l'atmosphère.

UNIVERSITY CENTRAL LIBRARY

Hydrocarbures

La végétation constitue une source naturelle d'hydrocarbures terpéniques dont la production est estimée à 10^9 t/an !

Les sources artificielles sont représentées par : les moteurs à explosion, les divers foyers domestiques et industriels, l'évaporation au niveau des cuves ou des réservoirs des véhicules automobiles. Cette dernière cause de contamination de l'atmosphère urbaine par des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques volatils peut se traduire, à elle seule, par des teneurs de l'ordre de 4 mg/m^3 d'air.

Cependant, la plupart des hydrocarbures proviennent des combustions incomplètes des carburants, aussi bien dans les moteurs à essence (ou diesel) que dans les chaufferies au fuel qui peuvent en France rejeter légalement 12,5 % d'imbrûlés dans l'atmosphère !

Les combustions incomplètes synthétisent aussi des hydrocarbures. Les imbrûlés renferment des oléfines (hydrocarbures insaturés) qui se forment par crackage des composés aliphatiques et interviennent dans l'apparition des nitrates de peracyles (PAN) dans certaines atmosphères urbaines très polluées et fortement ensoleillées (smogs photochimiques).

Au cours des combustions incomplètes s'effectue en outre la synthèse de dangereux hydrocarbures polycycliques carcinogènes : benzo–3,4–pyrène (le plus connu d'entre eux), benzanthracène, fluoranthrène, cholanthrène, etc. Ces derniers sont contenus dans les goudrons et suies rejetés par divers foyers, par les échappements des moteurs diesels et, dans une moindre mesure, par ceux des automobiles (Pattle et coll, 1957).

Il est indispensable, à cet égard, de remettre à sa juste place le moteur diesel, par rapport aux autres causes de pollution atmosphérique. Malgré les nombreux démentis intéressés de divers "spécialistes" des problèmes automobiles et . . . des transporteurs routiers, le diesel arrive au tout premier rang dans la contamination de l'atmosphère par les hydrocarbures carcinogènes. En effet, s'il émet peu ou pas d'oxyde de carbone et moins d'oxydes d'azote que le moteur à essence, le moteur diesel est, en revanche, une source beaucoup plus importante de pollution par les hydrocarbures polycycliques et aromatiques. De plus, à l'inverse des moteurs à essence, l'émission de ces substances s'accroît avec la charge (Kotin, Falck et Thomas, 1955). Certes, il est bien connu que l'émission de fumées et de suies est surtout le fait de moteurs aux injecteurs mal réglés (*). Toutefois, la bienveillance que l'administration paraît témoigner dans notre pays à l'égard de cette forme de pollution et l'inapplication ostensible d'une législation pourtant assez tolérante, permettent de constater à quiconque circule sur nos routes le volume inadmissible de fumées et de suies (carcinogènes) rejetées dans l'air par la quasi-totalité des camions. Dans les côtes, en particulier, là où les moteurs travaillent sous de fortes charges, presque aucun véhicule diesel n'émet au-dessous du maxi-

(*) Pour limiter la pollution de l'air par les moteurs diesels, la Suède, depuis 1969, a adopté une loi rendant obligatoire le contrôle et le réglage des injecteurs des moteurs de camions par des spécialistes de l'administration, qui les scellent pour rendre impossible leur manipulation par des tiers. Les contrevenants sont frappés de lourdes amendes . . .

BIBLIOTECA CENTRALA UNIVERSITARA

mum admis par les normes légales [1]. Ces gaz sont très toxiques ainsi que l'ont démontré Pattle et coll. (1957) et Sinha et Pande (1967).

On estime aux Etats-Unis que, sur 32×10^6 tonnes d'hydrocarbures rejetés chaque année dans l'atmosphère, plus de la moitié sont le fait des moteurs à explosion, 27 % provenant de sources diverses et 14 % de l'industrie.

Des recherches effectuées par ailleurs dans les laboratoires de la General Motors montreraient que l'automobile américaine "moyenne" rejetait 2 g d'hydrocarbures, 30 g d'oxydes de carbone et 4 g d'oxydes d'azote par km parcouru en 1970.

Aldéhydes

L'acroléine, composé très toxique et irritant, se rencontre non seulement dans l'air aux alentours des usines qui en font la synthèse, mais aussi dans les gaz émis par diverses combustions incomplètes. Les raffineries de pétrole, les incinérateurs d'ordures représentent une source importante de contamination de l'atmosphère par de l'acroléine et bien d'autres aldéhydes, de même que les moteurs à explosion. L'air des villes peut renfermer jusqu'à 1 mg/m^3 en équivalent-formol de ces diverses substances. Enfin, les fumeurs ignorent le plus souvent qu'elle figure parmi les composés les plus dangereux que renferme la fumée de tabac.

DERIVES DU SOUFRE

L'anhydride sulfureux (SO_2)

Il se rencontre dans l'air à l'état de traces infinitésimales en l'absence de source de pollution. On évalue à 0,2 ppb la concentration moyenne normale de ce gaz dans la troposphère (Robinson et Robbins, 1970).

Le volcanisme en constitue sans doute la seule source naturelle importante. Cependant, il existe d'autres causes spontanées enrichissant l'atmosphère en composés gazeux du soufre.

Il semble en revanche que la majorité du gaz sulfureux qui se dégage dans l'atmosphère soit le fait de l'homme. Comme pour bien d'autres polluants atmosphériques, c'est l'usage des combustibles fossiles qui constitue la principale cause de contamination.

La quantité totale rejetée chaque année dans la troposphère est estimée à 145×10^6 tonnes par Robinson et Robbins (cf. tableau XXVII). Selon ces auteurs, la combustion des charbons représente 70 % de ce total et celle des fuels 16 %. En effet, tous les combustibles fossiles renferment du soufre à des taux variables mais toujours importants. Si en Europe, et plus particulièrement en France, la houille est assez pauvre en soufre et titre rarement plus de 1 % de cet élément, il n'en est pas de même en Amérique du Nord où celle-ci en renferme jusqu'à plus de 5 % !

(1) Remarquons cependant qu'un diesel bien réglé et convenablement conduit n'est pas une source de pollution supérieure à celle des automobiles *à volume égal de carburant consommé.*

BOWLING GREEN STATE UNIVERSITY LIBRARY

Les fuels contiennent aussi beaucoup de soufre. Dans notre pays, la teneur moyenne des fuels domestiques est de 0,5 %, celle des fuels légers de 1,8 %, alors que l'on dépasse 3 % de soufre pour les fuels lourds industriels.

Certaines opérations métallurgiques libèrent également des quantités importantes d'anhydride sulfureux : une usine qui traite 1 000 t/jour de pyrites cuivreuses dégage 600 t/jour de ce gaz dans l'atmosphère. La synthèse de l'acide sulfurique peut aussi contaminer l'air en l'absence de mesures adéquates pour réduire les émissions de gaz sulfureux ([1]).

(1) Le procédé dit de la double catalyse, mis au point par Bayer, permet de diminuer de 98 % les émissions de SO_2 dans les unités industrielles qui fabriquent de l'acide sulfurique.

Quelle est maintenant la part des diverses activités humaines dans la contamination de l'atmosphère par ce gaz ?

Les usages domestiques jouent un rôle important dans ce phénomène. Dans la région parisienne, on estime à 40 % du total la quantité d'anhydride sulfureux émise par le chauffage des habitations. Cependant, l'emploi des fuels lourds par l'industrie intervient aussi de façon prépondérante dans la pollution de l'air par ce gaz. L'industrie française du verre, par exemple, a utilisé à elle seule en 1969 quelque 2×10^6 tonnes de fuels lourds pour alimenter ses fours ([2]).

(2) Précisons à cet égard que 36,8 % du pétrole importé en France en 1970 a été transformé en fuels domestiques et 26,2 % en fuels industriels, dont 22,9 % en fuels lourds très riches en soufre.

Aux Etats-Unis, les deux tiers de l'anhydride sulfureux sont émis en milieu urbain, où population et industrie sont concentrées, et les sept états du Nord-Est, essentiellement industriels, émettent la moitié de la quantité totale de ce polluant (33×10^6 tonnes en 1968).

Dans la région parisienne, quelque 240 000 tonnes de gaz sulfureux ont été déversées dans l'atmosphère en 1964. (Depuis, ces quantités auraient un peu diminué). L'atmosphère s'enrichit en anhydride sulfureux à cause de l'ampleur des volumes de ce gaz rejeté dans celle-ci, ainsi qu'en atteste l'évolution du pH des pluies dans l'hémisphère Nord (cf. fig. 4.2). Aucune ville européenne ou nord-américaine ne possède une teneur normale de l'air en gaz sulfureux. Celle-ci est toujours élevée, même en été. C'est cependant en hiver que s'observent les plus fortes concentrations. A Paris, la teneur moyenne était de 0,17 ppm en 1960 (Roussel, 1968). Bien que la teneur critique de 2 ppm soit rarement atteinte (on a signalé jusqu'à 2,5 ppm à Los Angeles), de nombreux toxicologues considèrent que l'exposition prolongée à plus de 0,10 ppm exerce une action néfaste à long terme sur la santé humaine.

L'anhydride sulfureux émis dans l'air n'y demeure pas *ad infinitum.* Il va y subir diverses transformations, qui font partie du cycle normal du soufre dans la biosphère.

En présence de lumière ultraviolette, l'anhydride sulfureux est transformé en anhydride sulfurique (SO_3) selon la réaction :

$$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_3 + 22 \text{ kcal} \qquad (1)$$

B.C EMINESCU" IA
GEOGRAFIE-GEOGRAFIE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

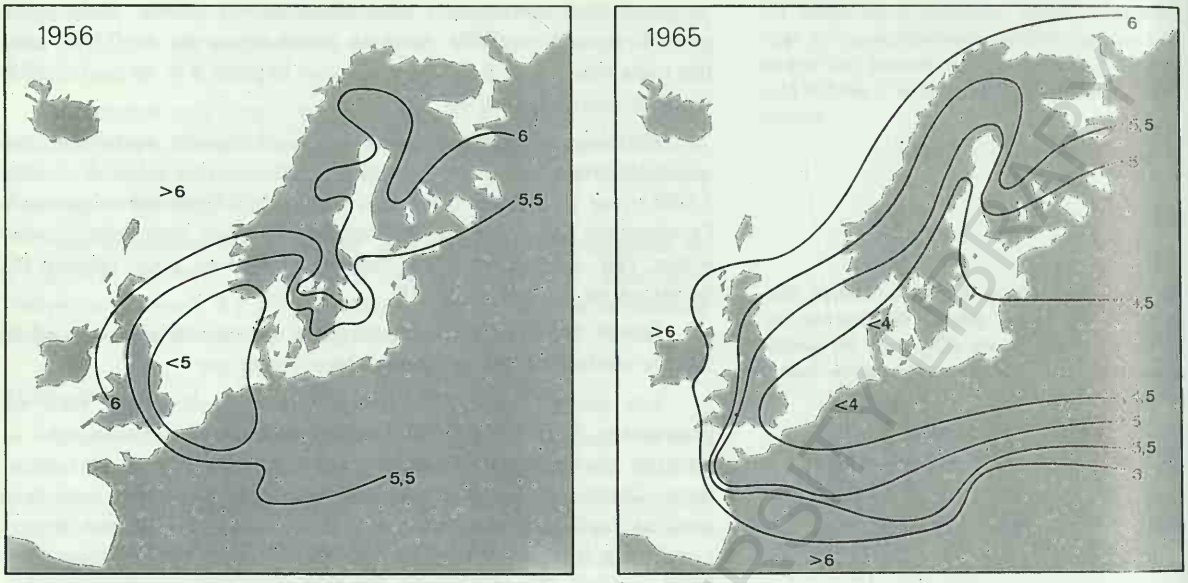


Figure 4.2
Variation du pH des précipitations en Europe entre 1956 et 1965. L'accroissement considérable de la pollution atmosphérique par le SO_2 s'est traduite au cours de ce laps de temps par une importante diminution du pH des eaux de pluie. Cette acidification présente de graves conséquences en Scandinavie car elle diminue la productivité biologique des lacs situés sur des terrains cristallins. D'après Odén, 1969, in *Lundholm*

Par ailleurs, au contact de la vapeur d'eau atmosphérique, il se formera de l'acide sulfureux :

$$SO_2 + H_2O \rightarrow SO_3H_2 + 18\ kcal \qquad (2)$$

Ces deux réactions sont lentes mais, en réalité, elles sont catalysées dans les atmosphères polluées par les poussières métalliques (fer et manganèse) qui les contaminent et peuvent alors se produire en phase liquide quelles que soient les conditions d'éclairement.

Ultérieurement, l'acide sulfureux formé, instable, se transforme spontanément en acide sulfurique.

On a récemment mis en évidence un autre type de réaction qui survient dans les atmosphères contaminées :

$$SO_2 + NO_2 + H_2O \rightarrow SO_4H_2 + NO \qquad (3)$$

Catalysée par la lumière solaire, cette réaction peut s'effectuer à des concentrations en gaz sulfureux et bioxyde d'azote aussi basses que 0,5 ppm (Bricard, dans Varney et Mac Cormac, 1971). Dans un cas comme dans l'autre, l'acide sulfurique formé, très hygroscopique, forme des brouillards très toxiques. Cet acide réagit avec les cations présents dans l'air, en particulier l'ammoniac et divers métaux basiques. Il se forme des sulfates solides, souvent solubles, qui sont ramenés au sol par les précipitations.

Hydrogène sulfuré (SH_2)

Ce composé existe à l'état naturel dans l'atmosphère. Il est produit par diverses fermentations anaérobies, œuvre de sulfobactéries, tant en milieu terrestre qu'océanique.

On évalue à 68×10^6 tonnes par an et 30×10^6 tonnes par an respectivement, les masses d'hydrogène sulfuré produites par ces micro-organismes en milieu continental et océanique (cf. tableau XXVII), soit une quantité totale de 98×10^6 tonnes par an de ce gaz rejetée chaque année dans l'atmosphère.

On ne dispose par ailleurs d'aucune donnée précise sur celles émises par le volcanisme.

Tableau XXVII — Production et concentration dans l'atmosphère des composés soufrés produits chaque année par la biosphère (*)

Composé	*Source*	*Emission moyenne en tonnes de S/an*	*Concentration normale dans l'air*
SO_2	Combustion du charbon	51×10^6	0,2 ppb
	Raffinage du pétrole	3×10^6	
	Combustion du pétrole	11×10^6	
	Métallurgie	8×10^6	
SH_2	Emissions industrielles	3×10^6	0,2 ppb
	Emissions marines	30×10^6	
	Emissions terrestres	68×10^6	
	Volcanisme	?	
SO_4	Emissions marines	44×10^6	1,5 ppb
Total		218×10^6 t de S/an	

* Selon Robinson et Robbins (1970), modifié.

La production d'hydrogène sulfuré d'origine industrielle est surtout le fait des installations pétrochimiques, qui constituent la principale source notable de pollution par ce gaz. La désulfuration du gaz de Lacq, très riche en soufre et qui renferme 15 % d'hydrogène sulfuré, s'accompagne du dégagement de 500 t/j de gaz sulfureux dans l'atmosphère. On évalue à 3×10^6 tonnes d'équivalent-soufre la quantité totale d'hydrogène sulfuré dégagée chaque année par l'activité humaine. Ces quantités sont assez faibles par rapport aux sources naturelles de ce gaz. La teneur normale de l'air en hydrogène sulfuré dans des régions exemptes de pollution est de l'ordre de 2 ppb.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Ce composé est très toxique et la concentration maximale admissible dans l'air est de 15 ppm. Il s'oxyde, spontanément dans l'atmosphère, en anhydride sulfureux selon un processus complexe.

Les mercaptans (ou thiols) contaminent l'air aux alentours des raffineries de pétrole, et lui confèrent une odeur aliacée très pénétrante ; cependant, ils ne constituent pas un élément permanent des airs pollués et leur présence est limitée aux atmosphères de certaines zones industrielles.

DERIVES DE L'AZOTE

Les oxydes d'azote (oxyde azotique NO et peroxyde d'azote NO_2 (1)) figurent parmi les constituants normaux de l'atmosphère. Mais ils sont aussi produits en quantités importantes lors des combustions à haute température et surtout dans les moteurs à explosion (à essence ou diesel).

(1) encore dénommé dioxyde d'azote (terminologie anglo-saxonne).

Quoique l'oxyde nitreux (N_2O) soit le plus abondant des oxydes d'azote dans les atmosphères non polluées avec une concentration moyenne de 0,25 ppm, il ne joue aucun rôle dans la pollution de l'air, à l'opposé de l'oxyde azotique et surtout du dioxyde d'azote (NO_2) dont l'importance est fondamentale dans tous les problèmes de pollution atmosphérique.

Le peroxyde d'azote est un gaz stable, fortement coloré en jaune, qui réduit beaucoup la visibilité atmosphérique et confère dans la plupart des cas une coloration brunâtre caractéristique aux masses d'air qui recouvrent les zones urbanisées. Par ailleurs, les propriétés physiques particulières de ce gaz, se traduisant par une importante absorption dans l'ultraviolet dans la zone de 3 000 à 4 000 Å, provoquent sa dissociation, grâce à l'énergie lumineuse absorbée par sa molécule selon la réaction :

$$NO_2 \xrightarrow[+\ 72\ kcal]{h\nu} NO + O \qquad (3)$$

Il engendrera alors une pollution de l'air dite *photochimique* par réaction de ces produits de décomposition avec d'autres composés contenus dans l'air pollué : anhydride sulfureux, oxygène, hydrocarbures. Parmi les diverses substances formées, certaines, comme les PAN, sont phytotoxiques et très irritantes pour la conjonctive.

Il est difficile d'empêcher les émanations de bioxyde d'azote dans l'atmosphère car elles résultent d'une réaction secondaire qui s'y effectue de façon spontanée à partir de l'oxyde azotique. On constate en effet que les gaz d'échappement des automobiles et, en général, tous ceux produits par combustion à haute température renferment beaucoup plus d'oxyde azotique que de peroxyde

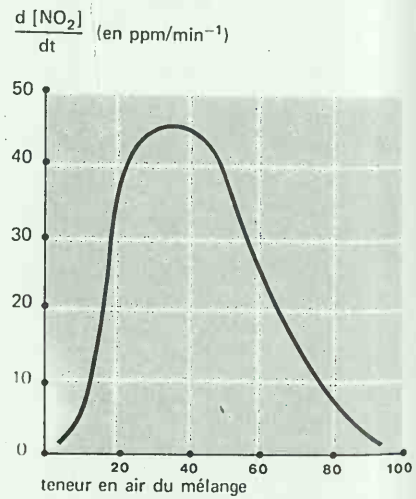


Figure 4.3
Taux de formation du NO_2 pendant la phase de dilution des gaz d'échappement d'une automobile contenant 1 000 ppm de NO_2. D'après Schuck et Stephens in *Pitts et Metcalf "Advances in environmental Sciences and technology", Wiley ed., 1969, vol. 1, p. 76*

BU INAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

d'azote. Ce dernier se forme pendant une réaction qui a lieu au cours de la phase de dilution dans l'air des gaz brûlés (Fig. 4.3). Celle-ci a pour équation :

$$2\,NO + O_2 \rightarrow 2\,NO_2 + 28{,}4\ kcal \qquad (4)$$

Cette réaction a tendance à s'effectuer en sens inverse au-dessus de 600° C, ce qui explique la prépondérance de l'oxyde azotique sur le peroxyde d'azote dans les gaz d'échappement. Comme ces derniers renferment en moyenne 1 000 ppm d'oxyde azotique dans le cas d'un moteur d'automobile en régime de croisière (avec des pointes à 2 800 ppm et une moyenne de 4 g d'oxyde émis dans l'air par km parcouru), on comprendra le rôle important que joue le moteur à combustion interne dans la pollution de l'atmosphère par ces composés (cf. tableau XXVIII).

On peut montrer à partir de l'équation (4) que la conversion de l'oxyde azotique en peroxyde d'azote s'effectue (compte tenu des concentrations moyennes du premier dans les gaz d'échappement), à une vitesse un million de fois supérieure à celle à laquelle se produit cette même réaction, dans les conditions normales dans une atmosphère non polluée, dont le taux d'oxyde azotique est de l'ordre de quelques ppb (cf. Schuck et Stephens, 1969).

On considère qu'il faut une semaine, à la température ambiante, pour que les $9/10^e$ d'une concentration initiale de 10 ppm d'oxyde azotique se transforment en peroxyde d'azote dans l'atmosphère. La concentration normale de ce dernier dans l'air de territoires situés à l'écart de toute contamination industrielle est estimée, selon leur localisation, entre 0,5 et 4 ppb. Dans les mêmes conditions, le taux de ce gaz est en moyenne quatre fois supérieur, dans les masses d'air continentales, à celui observé au-dessus des océans. On a de plus détecté jusqu'à 20 ppb dans des régions de volcanisme intense.

Dans les zones urbaines fortement polluées, cette même concentration peut dépasser 0,1 ppm (Fig. 4.4).

On évalue à 53×10^6 tonnes par an la quantité de peroxyde d'azote rejetée dans l'atmosphère par l'ensemble des activités humaines, ce qui représente le dixième de la masse totale de ce gaz formée chaque année par les divers processus biogéochimiques (cf. tableau XXVIII, p. 204).

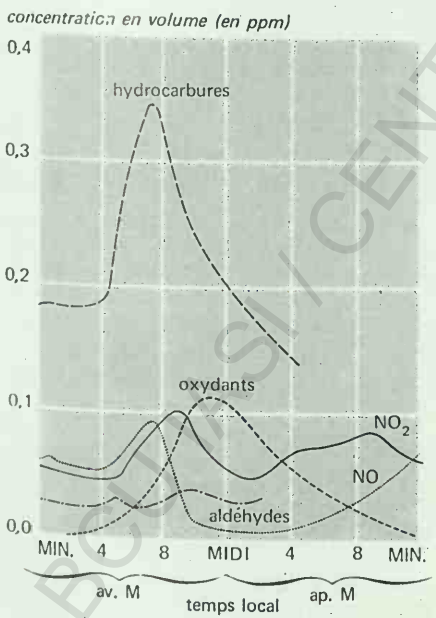


Figure 4.4
Variation de la concentration de l'atmosphère en divers polluants au cours d'une journée dans les parties basses de la ville de Los Angeles. Remarquer le pic de concentration des hydrocarbures du NO_2 et des aldéhydes à 8 heures du matin, au moment où la circulation automobile est la plus intense. D'après Pitts in *"Advances in environmental Sciences and technology", Wiley ed., 1969, t. 1, p. 301*

ECOLE SUPERIEURE D'INGENIEURS DE MARSEILLE CENTRE DE DOCUMENTATION LIBRARY

Tableau XXVIII — Emission globale et concentration naturelle des composés volatils de l'azote (*)

Substances	*Sources industrielles (en 10^6 t/an d'équivalent azote)*	*Sources biologiques (en 10^6 t/an d'équivalent azote)*	*Concentration en atmosphère non polluée* (en ppb)	*Masse totale existant dans l'atmosphère* (en t/an)
NO_2	Combustions Charbon 8,2 x 10^6 Essence 2,3 x 10^6 Fuels 4,5 x 10^6 Divers 1,1 x 10	Microorganismes anaérobies produisant du NO qui s'oxyde dans l'air en NO_2 (et processus géochimiques)	Air continental 4 ppb Air océanique 1 ppb	12 x 10^6
	Total : 16,1 x 10^6	150 x 10^6		
NH_3	Combustions	Microorganismes anaérobies 4 900 x 10^6	6 ppb	30 x 10^6
N_2O	Négligeable	idem 410 x 10^6	250 ppb	1 500 x 10^6

(*) D'après Robinson et Robins, 1970, modifié.

La comparaison des quantités de peroxyde d'azote et d'autres composés gazeux de l'azote produites annuellement par les sources naturelles ou industrielles de ce gaz, avec les masses totales de ces composés que renferme l'atmosphère, montre l'existence de processus d'extraction empêchant leur accumulation dans l'air. A l'image du gaz carbonique, un ensemble de phénomènes biogéochimiques transforme et enlève la plupart des composés azotés qu'introduisent dans l'atmosphère les êtres vivants et l'action humaine.

Les sources industrielles de peroxyde d'azote sont près de dix fois moins importantes que celles d'origine naturelle (16,1 x 10^6 t/an et 150 x 10^6 t/an respectivement). Ces dernières sont surtout d'origine biologique. La production de peroxyde d'azote par voie géochimique (volcanisme et décharges électriques dans la haute troposphère lors d'orages) semble en effet d'importance minime par rapport à l'émission d'oxyde azotique par les micro-organismes.

Le peroxyde d'azote formé par ces divers processus ne séjourne pas longtemps dans l'atmosphère — trois jours en moyenne. Il se transforme ensuite en acide nitrique au contact de la vapeur d'eau contenue dans l'air, lequel est ensuite rapidement converti en NO_3NH_4 (surtout) au contact de l'ammoniac atmosphérique. L'ensemble des nitrates ainsi formés par réaction de l'acide nitrique avec les divers cations présents dans l'air se rencontre dans les aérosols atmosphériques. Ils sont ensuite ramenés au sol au moment des précipitations. Ceci permet d'expliquer un phénomène connu depuis longtemps de façon empirique par les cultivateurs : celui du pouvoir fertilisant de la neige. En effet, au

BIMA / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

moment de sa chute, les flocons effectuent une filtration de l'atmosphère. Ils entraînent ainsi à la surface des champs des nitrates, présents dans les aérosols qui sont restitués à la terre, lorsque la neige fond, au printemps. Elle apporte alors aux plantes des éléments nutritifs à une époque de l'année où leurs besoins en nitrates sont particulièrement élevés.

En définitive, la quasi-totalité de l'acide nitrique formé dans l'atmosphère se transforme en aérosols minéraux (nitrates). On ne rencontre guère de concentration quelque peu importante de cette substance que dans l'air ambiant d'installations industrielles où l'on en fait la synthèse.

Peroxy-acyl-nitrates (PAN)

Ces substances se forment par réaction photochimique entre divers constituants des atmosphères polluées exposées à de fortes insolations. Elles ne peuvent donc guère apparaître que dans l'air de villes qui jouissent d'un climat méditerranéen. Tel est le cas de Los Angeles où fut décrit pour la première fois le phénomène du smog oxydant, au début des années 1950 (selon Pitts, 1969).

Les PAN se forment selon la réaction générale suivante :

$$R-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O-O-+NO_2 \rightarrow R-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O-O-NO_2 \qquad (5)$$

où R peut être aliphatique, aromatique ou hétérocyclique.

Les premiers membres de la série des peroxy-acyl-nitrates sont :

- le peroxy-acétyl-nitrate ($R = CH_3-$)
- le peroxy-propionyl-nitrate ($R = CH_3 - CH_2 -$)
- le peroxy-butyryl-nitrate ($R = CH^3 - CH_2 - CH_2 -$).

Ils ont été identifiés dans l'air des villes californiennes et d'autres localités où sévit le smog photochimique.

Stephens (1969) signale aussi la mise en évidence de peroxy-benzoyl-nitrate (PB_zN) où $R = C_6H_6$. Ce composé produit une irritation de la conjonctive à une concentration 200 fois plus faible que celle de formol induisant cet effet.

Les smogs oxydants provoquent l'apparition de PAN dans une série de réactions photochimiques qui mettent en jeu les oxydes d'azote, l'ozone et les hydrocarbures imbrûlés rejetés dans l'air par les moteurs à explosion. Ces réactions sont des plus complexes, non seulement par la diversité des composés chimiques qui interviennent, mais aussi par celle des mécanismes qui les caractérisent. Elles sont de plus marquées, dans leurs premières étapes, par la formation transitoire d'ozone (O_3).

Le peroxyde azotique formé par oxydation photochimique de l'oxyde azotique peut aussi subir une dissociation du même type.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Nous avons la réaction suivante, aux effets inverses de l'équation (4) :

$$NO_2 \xrightarrow{h\nu} NO + O_{..} \qquad (6)$$

(3000 Å < λ ⩽ 4200 Å).

L'oxygène atomique ainsi formé réagira à son tour avec l'oxygène moléculaire, en présence d'aérosols métalliques qui catalysent la réaction :

$$O_{..} + O_2 \xrightarrow{M} O_3 \qquad (7)$$

L'effet net des deux réactions inorganiques (6) et (7) se traduira par un état d'équilibre dynamique entre la formation de NO_2 et d'ozone :

$$NO_2 + O_2 \underset{}{\overset{UV}{\rightleftharpoons}} NO + O_3 \qquad (8)$$

On constate que le maximum de concentration des oxydants dans l'atmosphère des villes subissant le smog photochimique s'observe à midi (fig. 4.5).

L'oxygène atomique et l'ozone ainsi formés attaqueront les hydrocarbures avec formation d'alcoylperoxydes (R — O — O —) et de peroxyacyles $R - \underset{\underset{O}{\|}}{C} - O - O -$.

Ces derniers se combineront à leur tour au peroxyde d'azote selon la réaction (5) et produiront ainsi des PAN. Notons enfin que ces composés ont été synthétisés en laboratoire par irradiation ultra-violette d'un mélange de peroxyde d'azote, d'ozone et de certains aldéhydes.

A une concentration de quelques dizaines de ppb, les PAN peuvent provoquer une forte irritation oculaire et de sérieux dommages aux végétaux. Fréquents dans l'atmosphère des villes à climat ensoleillé et très pollué, leur concentration est cependant inférieure à 50 ppb dans les environs de ces agglomérations (Stephens, 1969).

L'OZONE (O_3)

C'est un constituant normal de l'atmosphère. Sa teneur au sol varie selon l'intensité de l'irradiation U.V. On l'évalue à 15 ppb dans l'air de zones désertiques très irradiées et on en détecte jusqu'à 150 ppb vers 3 000 m d'altitude dans des régions montagneuses exemptes de pollution.

La concentration en ozone dans l'air s'élève avec l'altitude pour atteindre un maximum dans la stratosphère entre 18 et 35 km (Fig. 3,1 et 4.6).

Dans les atmosphères des villes soumises au smog photochimique, on a pu relever des concentrations d'ozone supérieures à une ppm. Celles-ci sont nocives pour les animaux et plus encore pour les végétaux.

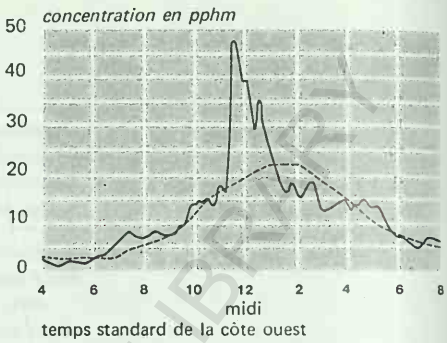


Figure 4.5
Variation de la teneur de l'air en oxydants au cours de la journée à Pasadena (Californie). La courbe pointillée correspond à la moyenne de trois mois de mesures, le trait continu figure les fluctuations relevées pendant une seule journée. Fait caractéristique des smogs photochimiques, le taux maximum de substances oxydantes est atteint vers midi, quand le flux solaire est le plus intense. D'après Pitts, 1969, p. 294

BIBLIOTECA CENTRAL UNIVERSITARIA

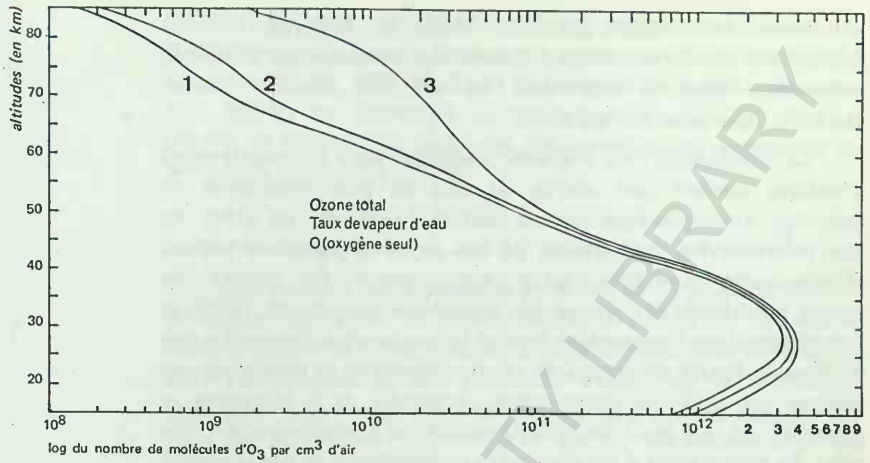


Figure 4.6

Prévision de l'influence des avions supersoniques de transport sur le taux en ozone de l'atmosphère aux diverses altitudes, selon les calculs de London et Park (1970). Les courbes 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux concentrations que l'on observerait dans des atmosphères théoriques qui titreraient respectivement 20 ppm, 5 ppm et 0 ppm de vapeur d'eau aux altitudes de vol des SST. Il apparaîtrait que l'influence de ces aéronefs sur la teneur de l'air en O_3 serait négligeable, sauf au niveau de la mésosphère où elle pourrait être réduite de 30 % Remarquons cependant que l'ozone présent à ces altitudes ne joue qu'un rôle minime dans la filtration des U.V. de haute énergie car sa concentration y est 5 000 fois plus faible que dans la basse stratosphère (In M I T Man's impact on the global environment, *Cambridge U.P. Mass., 1970, n° 132, p. 102).*

Si la pollution de l'air urbain conduit à la formation d'ozone, à l'opposé, certains spécialistes ont eu récemment quelques appréhensions relatives à une éventuelle diminution de la concentration stratosphérique en ce gaz, par suite du vol des avions supersoniques de transport. Il ne semble pas, d'après les travaux de London et Park (1970), que de telles craintes soient justifiées (cf. plus loin le paragraphe sur les effets climatiques de la pollution de l'air, p. 195).

DERIVES HALOGENES

La plupart des polluants que nous venons d'étudier proviennent avant tout des combustions. Leur émission est aussi bien d'origine individuelle (automobiles, foyers domestiques) qu'industrielles. Au contraire, ceux qui suivent sont dans leur quasi-totalité émis par l'industrie. Tel est en particulier le cas des dérivés halogénés : chlore, acide chlorhydrique, brome, fluor, et acide fluorhydrique. Les unités industrielles préparant ces composés sont souvent implantées à l'écart des villes à cause de leur haute toxicité.

L'électrochimie de l'alumine représente une importante source de pollution fluorée. En effet, elle utilise comme fondant la cryolithe, fluorure double d'aluminium et de silicium (F_6AlNa_3). Une partie de ce composé, qui joue un rôle analogue à celui d'un solvant, participe à l'électrolyse, de sorte qu'il se produit un dégagement de fluor à l'anode. En France, la vallée de la

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Maurienne, où existent plusieurs unités de ce type, présente aujourd'hui une forte pollution fluorée aux conséquences tout aussi redoutables pour la végétation, les sols, les animaux domestiques . . . que pour les habitants.

La combustion des matières plastiques dans les incinérateurs d'ordures devient une source de plus en plus importante de pollution atmosphérique par les dérivés halogénés. En effet, les polychlorovinyles, fort utilisés de nos jours, dégagent en brûlant d'importantes quantités d'acide chlorhydrique. Par ailleurs, les agents plastifiants du groupe des biphényles polychlorés (BPC) se volatilisent dans l'atmosphère lors de la combustion incomplète des plastiques. Doués de propriétés physicochimiques et toxicologiques voisines du DDT, ils contaminent l'ensemble de la biosphère et soulèvent de nos jours de délicats problèmes d'environnement. En effet, ils sont soumis à un transport atmosphérique et par la suite à une retombée dans l'océan en des lieux fort éloignés de leurs sources d'émission.

Les poussières ("aérosols")

L'injection de particules solides dans l'atmosphère constitue aussi un élément important de sa contamination par l'activité humaine. Précisons cependant qu'il existe par ailleurs d'importantes sources naturelles d'aérosols (érosion éolienne, volcanisme par exemple). A l'image de ce que l'on observe avec divers polluants atmosphériques gazeux, l'intervention de l'homme se traduit ici encore par un apport supplémentaire aux quantités normalement introduites chaque année dans l'atmosphère par les processus biogéochimiques normaux.

Les combustions incomplètes représentent une cause essentielle d'émission de particules. Des aérosols au sens strict, (gouttelettes liquides en suspension dans l'air), peuvent aussi être produits en certaines circonstances : par exemple lorsque des moteurs à explosion rejettent des huiles minérales imbrûlées ou des goudrons dans leurs gaz d'échappement (fumées bleues) ([1]). En outre, nous avons vu que certains polluants atmosphériques sont transformés en substances hygroscopiques et donnent de vrais aérosols (cas de la transformation de l'anhydride sulfureux en acide sulfurique ou de la formation de sels hygrophiles à partir d'autres anions).

Les diverses particules ainsi dispersées dans l'air peuvent se classer par ordre de tailles décroissantes en catégories distinctes :

1) poussières de grand diamètre, sédimentables,

2) poussières semi-fines peu ou pas sédimentables,

3) poussières inframicroscopiques insédimentables.

Les grosses particules sédimentables

Elles mesurent en moyenne 20 μ, se localisent dans les basses couches de la troposphère (au-dessous de 3 000 m) et retombent rapidement dans les environs de leurs sources d'émission. Elles

(1) Il faut mentionner à ce propos que la fumée de cigarette — un polluant volontairement rejeté dans l'air des locaux d'habitation ou des lieux publics — est constituée par un aérosol de composition complexe riche, entre autres, en goudrons et en aldéhydes (acroléine, p.e.).

BOUJAS/CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

prédominent dans l'atmosphère des agglomérations fortement industrialisées. En Grande-Bretagne, le ministère de la technologie, qui disposait en 1966 de 2 611 instruments de contrôle de pollution répartis sur l'ensemble du territoire, évaluait à 380 t/km^2 et par an, la quantité de particules sédimentables qui retombent sur les régions d'industrie lourde !

Les particules semi-fines

Elles ont une taille comprise entre 2,5 et 0,1 μ. Cette dernière dimension représente la limite inférieure au-delà de laquelle la sédimentation n'est plus possible à cause du mouvement brownien, dont l'accélération devient supérieure à celle de la gravitation. Elles sont malgré tout ramenées tôt ou tard au sol, même si leur taille est plus faible que 1 000 Å, par les précipitations et des phénomènes électrostatiques qui conduisent à leur agglomération en certaines circonstances.

Les particules de taille inférieure à 1 μ sont très importantes au point de vue météorologique car elles constituent des noyaux de condensation très efficaces pour la vapeur d'eau.

Les particules inframicroscopiques

Elles constituent le plus petit élément des "aérosols" atmosphériques. Leur taille peut descendre au-dessous de 10 Å. On les dénomme souvent particules (ou noyaux) d'Aitken. Leur diamètre moyen est à peine de 300 Å ! Elles sont de composition inconnue, par suite de la masse infime qu'elles représentent par rapport aux autres constituants des poussières. Elles se rencontrent dans toute l'atmosphère mais leur concentration décroît très vite au-delà de la tropopause.

On considère que la majorité des aérosols ont un diamètre compris entre 0,1 et 20 μ. Ils jouent un rôle très important dans les principaux phénomènes atmosphériques par suite de leur pouvoir de diffusion des radiations, lequel interfère avec de nombreux facteurs écologiques de première importance (éclairement, température au sol, par exemple).

ORIGINE ET CONSTITUTION CHIMIQUE DES "AEROSOLS"

Particules émises par des sources naturelles

Une grande partie des aérosols présents dans l'atmosphère provient des tempêtes de sable dans les zones désertiques. Il s'agit de particules qui mesurent aux alentours de 0,3 μ, surtout de nature silicieuse. L'homme intervient aussi de façon indirecte dans leur formation. Il accroît leur nombre en créant des déserts par de mauvaises pratiques agricoles, en particulier par la mise en valeur de sols fragiles dans des zones semi-arides.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les éruptions volcaniques représentent aussi une source importante d'aérosols de toutes tailles et de gaz sulfureux (SO_2) qui, par la suite, donne des particules dans l'atmosphère lorsqu'il se transforme en acide sulfurique puis en sulfate d'ammonium.

La taille des poussières d'origine volcanique est des plus variables. Les éruptions de première magnitude s'accompagnent de l'introduction de plusieurs millions de tonnes de telles particules dans la stratosphère.

Les tempêtes océaniques entraînent des embruns dans l'air. Les aérosols marins ainsi constitués donnent, après évaporation, des particules salines de 0,3 μ de diamètre moyen, dont le nombre décroît beaucoup au-delà de 3 000 m d'altitude.

Enfin, les incendies de forêts et les cultures itinérantes sur brûlis, encore fréquents dans les régions intertropicales, constituent une source à la fois naturelle ou d'origine humaine émettant des aérosols. Les brouillards bleus observés par satellites au-dessus de l'Afrique, de l'Asie du Sud Est et au Brésil ont été attribués à de telles causes.

Aérosols produits par l'homme

Les combustions introduisent dans l'atmosphère de nombreuses variétés minérales, des métaux et des particules carbonées (suies, par exemple). Les fumées des chaufferies industrielles et autres foyers fonctionnant au charbon ou aux fuels lourds sont très chargées de telles particules. De même, les échappements d'automobiles rejettent des aérosols riches en plomb.

Les industries extractives et, de façon générale, toutes celles qui fabriquent ou utilisent des matériaux de construction : concasseurs de carrières, cimenteries, chantiers du bâtiment, travaux de génie civil, etc., participent amplement à la dispersion de poussières dans l'atmosphère. Il faut, par exemple, broyer 2,8 tonnes de divers minéraux pour obtenir une tonne de ciment. De la sorte, les cimenteries françaises rejetaient en moyenne 3 % de leur production dans l'air à la fin des années 60, soit environ 100 000 tonnes de poussières, sous forme de particules ayant une dizaine de microns de diamètre !

Les industries sidérurgiques sont aussi génératrices d'une intense pollution atmosphérique. Stockage, manutention et installation d'agglomération des minerais d'une part, cockeries, aciéries à l'air soufflé — et dans une moindre mesure à l'oxygène pur — de l'autre, créent des quantités considérables de poussières, en l'absence de dispositifs d'épuration convenables.

Les aciéries injectent dans l'atmosphère d'énormes panaches de fumées rouges constituées par de très fines particules d'oxyde de fer (0,1 μ de diamètre) qui arrivent à diminuer de façon significative l'ensoleillement au sol aux environs des installations.

Les métallurgies non ferreuses — zinc, plomb, cuivre et aluminium — sont aussi très polluantes.

ROBERT GORDON UNIVERSITY LIBRARY

Parmi les poussières sédimentables ainsi recueillies en zone industrielle, on détecte de nombreuses variétés minérales : quartz, calcite, feldspath, gypse, anhydrite et asbeste. Cette dernière substance est une variété de l'amiante, fort utilisée comme matériau isolant. Il s'agit d'un silicate de magnésium hydraté qui sert pour la fabrication des garnitures de frein — il est de la sorte pulvérisé dans l'air quand les véhicules ralentissent — et dans le bâtiment et la métallurgie comme ignifugeant. L'asbeste provoque des lésions pulmonaires à évolution lente mais irréversible à des doses beaucoup plus faibles que tout autre minéral renfermant de la silice.

Les poussières sédimentables recueillies dans les zones industrielles renferment en moyenne 20 % d'oxyde de fer, 15 % de silice et 5 % de suies. Le reste est constitué par divers oxydes métalloïdiques (du manganèse, du vanadium, du molybdène, de l'arsenic, de l'antimoine) et de divers métalloïdes toxiques comme le sélénium et le tellure.

Brar et ses collègues (1970) ont étudié la composition en corps simples des aérosols qui contaminent l'atmosphère dans le district urbain de Chicago, où un grand nombre d'industries lourdes sont implantées. Ils ont pu ainsi mettre en évidence une vingtaine d'éléments présents à l'état de traces dosables : fer, chlore, aluminium, zinc, manganèse, sodium, brome, vanadium, chrome, antimoine, mercure, sélénium, cérium, argent, cobalt, lanthane, scandium et europium, par ordre d'importances décroissantes. Certains de ces éléments, tels le fer, l'aluminium et le manganèse, ou encore les lanthanides, proviennent certainement des industries métallurgiques locales. En revanche, le vanadium et le mercure capturés par leurs filtres à poussières ne semblent pas associés à ces industries et proviennent selon toute vraisemblance de phénomènes plus généraux de contamination de l'atmosphère (1).

Les fluorures constituent une autre catégorie de particules d'origine industrielle. Outre les usines d'aluminium, les installations qui fabriquent des engrais phosphorés et les briquetteries représentent aussi une cause de pollution par ces substances. A titre d'exemple, le traitement d'une tonne de phosphate s'accompagne du dégagement dans l'air de 100 g de fluorure.

Le plomb.

La technologie moderne fait un usage considérable du plomb. Les principales sources de contamination par ce métal sont l'industrie métallurgique (fonderies), l'automobile — de façon indirecte ou directe avec les carburants — et les incinérateurs d'ordures.

La fabrication des batteries électriques consomme à elle seule près du tiers de la production mondiale de plomb. Depuis 1924, l'adjonction de plomb tétraéthyle aux essences comme antidétonant afin d'élever leur indice d'octane, a été la cause d'une très considérable pollution de l'atmosphère par ce métal. Chaque auto-

(1) La contamination de la biosphère par le vanadium et le mercure provient *pro parte* de l'utilisation du charbon et du pétrole comme combustible. En effet, ces éléments se rencontrent dans les diverses formes de carbone fossile à des taux nettement supérieurs à ceux auxquels ils existent dans l'ensemble de la biosphère. Le vanadium, non volatil, se concentre dans les cendres de charbon et les fumerons produits par les chaufferies au fuel et est rejeté en partie dans l'air avec les fumées. Quant au mercure, dont la tension de vapeur est faible, il se volatilise lors des combustions. Jeensu (1971) évalue à 3 000 t/an la quantité de cet élément ainsi dispersée dans l'atmosphère par l'usage des combustibles fossiles.

mobile européenne rejette en moyenne 1 kg de plomb par an dans l'atmosphère sous forme d'aérosols (Wolman et Friberg, 1968).

La totalité de la biosphère est aujourd'hui contaminée par le plomb d'origine industrielle. Les travaux de Murozumi, Chow et Petterson (1969), ont montré le rapide accroissement de la pollution de l'environnement par le plomb au cours des dernières décennies. Ces auteurs ont étudié le taux de plomb dans les couches de neige accumulées depuis plusieurs milliers d'années à la surface de l'inlandsis groenlandais (Fig. 4.7). Bien que l'homme ait commencé à utiliser ce métal vers 2500 avant J.C. le taux, dans les glaces du Groenland, est resté normal jusqu'en 800 avant J.C. Puis ce taux s'est mis à croître lentement : en 1750, il s'élevait à 25 fois au-dessus du taux normal (0,0004 µg/kg de neige). En 1940, la concentration du plomb dans les neiges déposées cette année-là était 175 fois supérieure au niveau naturel et elle excédait de 500 fois ce dernier dans la couche accumulée en 1966.

Il existe aussi une remarquable corrélation entre l'accroissement rapide de la contamination par le plomb des glaces du Groenland à partir de 1950 et l'augmentation des quantités de plomb tétraéthyle consommées par les moteurs à essence (Fig. 4.7 et tableau XXIX). Nulles en 1923, celles-ci ont dépassé 300 000 tonnes en 1970. Par suite de la densité de la circulation automobile, l'atmosphère urbaine est fortement polluée par le plomb.

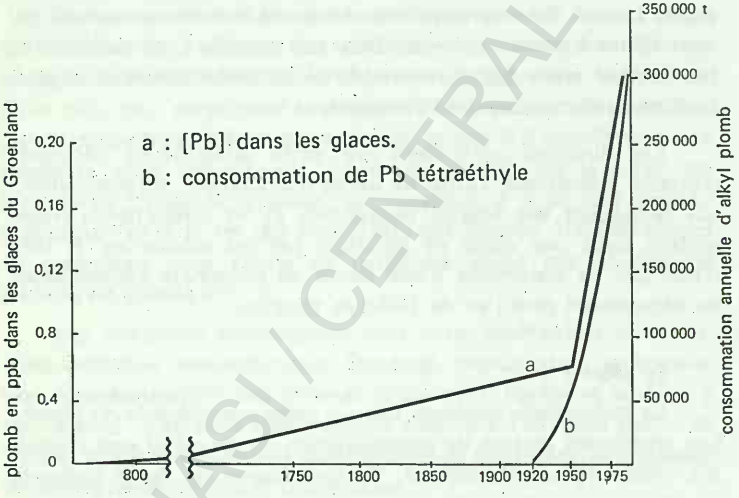


Figure 4.7
Corrélation entre l'accroissement du taux de plomb dans les glaces de l'inlandsis groenlandais en fonction du temps et celui de la consommation de plomb tétraéthyle dans l'hémisphère Nord depuis le début de sa fabrication industrielle en 1920. D'après Bull. Field Mus. Nat. History, 41, 1970 p. 10.

BU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XXIX — Production et contamination de la biosphère par le plomb pendant la période historique, d'après l'étude de son accumulation dans les glaces du Groenland (*)

	Contamination due à la métallurgie du plomb			*Contamination due à l'usage du plomb tétra-éthyle comme antidétonant*				
Emission de plomb Date	Plomb raffiné (en 10^5 t/an)	Fraction convertie en aérosols (en % du total produit)	Production annuelle d'aérosols par les fonderies (en 10^3 t/an)	Plomb brûlé dans les carburants (en 10^5 t/an)	Fraction convertie en aérosols (en % du total brûlé)	Production annuelle d'aérosols par suite de l'usage de carburants au Pb (en 10^3 t/an)	Production totale d'aérosols constitués par du plomb particulaire (en 10^3 t/an)	Concentration du plomb dans les neiges du Groenland (en µg/kg de neige)
− 2500	0	0	0	0	0	0	0	0,0004
− 800	?	?	?	0	0	0	0	0,003
1753	1	2	2	0	0	0	2	0,01
1815	2	2	4	0	0	0	4	0,03
1933	16	0,5	8	0,1	40	4	10	0,07
1966	31	0,06	2	3	40	10	100	0,2

* D'après Murozumi et coll. 1969 et Patterson, 1971.

VARIATIONS DANS LA TENEUR ATMOSPHERIQUE ET LA DISTRIBUTION DES AEROSOLS

Il existe d'importantes fluctuations dans la nature et la teneur de l'air en particules, selon la localisation géographique et l'altitude à laquelle est effectué le prélèvement.

La concentration des aérosols s'échelonne de moins de 10^7 particules par m^3 en atmosphère normale à 2×10^9 par m^3 et plus, dans les agglomérations industrielles polluées. Alors que le nombre moyen de particules d'Aitken est de $100 \times 10^8/m^3$ dans les airs les plus purs de régions montagneuses reculées, celui-ci s'élève à $50 \times 10^{11}/m^3$ dans les grandes villes américaines (Schaeffer, 1970).

Le taux moyen de poussières dans l'air urbain est compris entre 0,06 et 0,1 µg/m^3 (Morgan et Ozolins, 1971), aux Etats-Unis.

Plomb particulaire

Parmi les divers types d'aérosols produits par l'homme, ceux constitués par des particules de plomb ont donné lieu à de nombreux travaux, par suite de l'importance toxicologique de ce métal. Inférieure à 0,001 µg/m^3 dans l'atmosphère des zones les plus reculées de la biosphère (comme le Pacifique Central), elle s'élève à 0,1 µg/m^3 en milieu rural et à plus de 1 µg/m^3 dans l'air des villes. Les carrefours atteignent en moyenne 5 µg/m^3 et on

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

détecte jusqu'à 30 $\mu g/m^3$ dans des tunnels routiers (Chisolm, 1971). A Paris, des concentrations de 10 $\mu g/m^3$ ne sont pas rares dans des rues étroites et encombrées. Il convient de préciser que la législation du travail tolère au maximum une exposition permanente à 0,7 $\mu g/m^3$ dans les locaux industriels. En effet, le plomb pénètre dans l'organisme tout autant par inhalation que par ingestion.

Il existe, en conclusion, une excellente corrélation entre la densité de la circulation automobile, laquelle dépend elle-même de façon directe du niveau d'intensité de l'urbanisation, et le taux de plomb dans l'air. Les recherches de Burnham, Moore et coll. (1970, 71) ont montré par exemple que ce taux varie dans l'atmosphère de Chicago en correspondance étroite avec la densité des constructions : les quartiers centraux sont les plus contaminés, et la concentration de cet élément dans l'air décroît rapidement quand on s'en éloigne. Le taux moyen, qui s'élève à 3,18 $\mu g/m^3$ au centre de la ville, tombe à 0,17 $\mu g/m^3$ en zone rurale (Fig. 4.8). Par ailleurs, les recherches de ces auteurs ont mis en évidence une inquiétante tendance à l'augmentation de la concentration en plomb de l'air dans la région de Chicago entre 1964 et 1967 (Fig. 4.9).

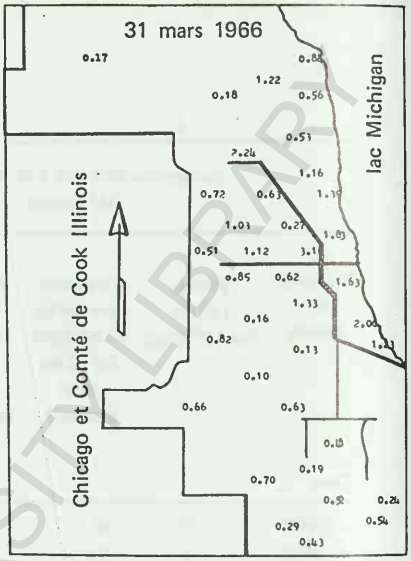


Figure 4.8
Concentration du plomb dans l'air de la ville de Chicago (Journ. Environ. Sci. and Technol., 3, 1969, p. 472)

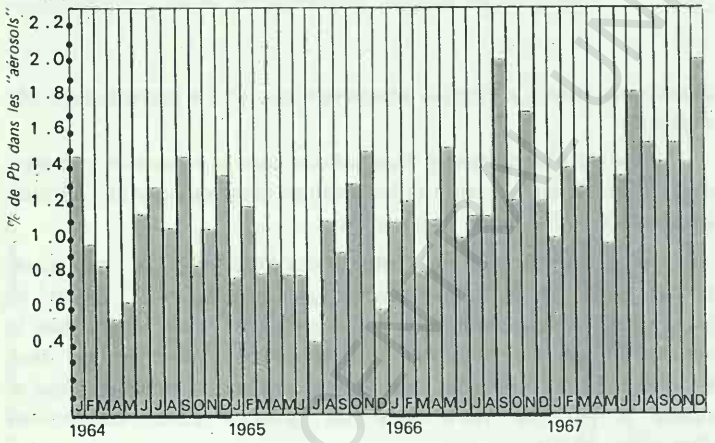


Figure 4.9
Tendance à l'augmentation de la teneur de l'air en plomb particulaire dans la banlieue de Chicago. D'après appl. Spec. 24, 1970, p. 411, in *C E Moore, 1971*

Le temps moyen de séjour du plomb dans l'air, pour les particules de 0,05 à 5 μ de diamètre, serait de l'ordre de plusieurs semaines, ce qui explique leur transport à partir de zones industrielles vers des régions aussi isolées que l'inlandsis groenlandais (Burton et Stewart, 1960). Il est ensuite ramené au sol ou dans l'océan par les précipitations. En zone urbaine, les eaux de pluie contiennent jusqu'à 40 μg de plomb/l.

BOUVIER / CENTRE DE DOCUMENTATION UNIVERSITAIRE LIBRARY

Autres sources d'aérosols

L'estimation des masses de particules produites par l'homme est déjà difficile ; encore plus délicate est celle des quantités d'aérosols introduites dans l'atmosphère par des phénomènes naturels.

Parmi les divers types de poussières présentes dans les hautes couches de l'atmosphère, une mention particulière revient à celles engendrées par les météorites. Ces derniers représentent une source d'aérosols mésosphériques, stratosphériques et même troposphériques, évaluée entre 5×10^5 et 5×10^7 tonnes par an.

Le volcanisme injecte des masses considérables de particules dans l'atmosphère.

La mésosphère, elle-même, est atteinte lors des éruptions de première magnitude, au cours desquelles des cendres sont projetées à plus de 50 km d'altitude ! On a pu évaluer à 10^{10} tonnes la quantité totale de poussières volcaniques rejetées dans l'atmosphère par l'explosion du Krakatoa, en 1883. De même, l'éruption du Mont Agung à Bali, en mars 1963, aurait injecté dans celle-ci 10^9 tonnes de particules.

La distribution des aérosols dans l'atmosphère n'est pas homogène. Très abondants au niveau des basses couches atmosphériques, ils se raréfient ensuite avec l'altitude dans la haute troposphère. Puis leur concentration s'élève à nouveau dans la stratosphère où l'on a mis en évidence une importante couche de particules entre 16 et 28 km de hauteur (Fig. 4.10).

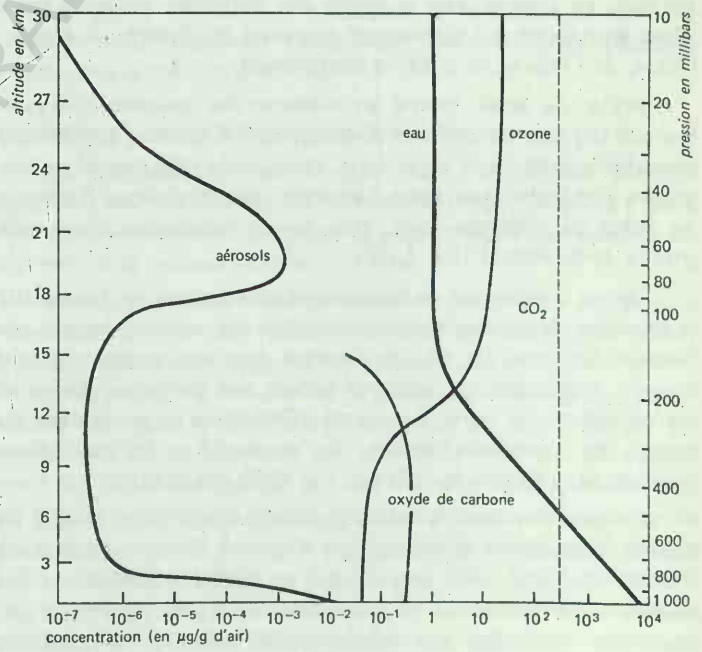


Figure 4.10
Variation en fonction de l'altitude des principaux constituants atmosphériques avec lesquels interfère l'activité humaine. D'après Newell, in Scient. Amer., janvier 1971, p. 39

BU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'homme intervient pour une part très significative dans la turbidité de l'air au voisinage du sol. A l'opposé, la couche stratosphérique est essentiellement d'origine naturelle, bien que l'activité industrielle contemporaine ait tendance à l'enrichir. Cette couche est constituée par des particules météoriques, des poussières volcaniques et du sulfate d'ammonium qui se forme à partir du gaz sulfureux, de l'hydrogène sulfuré et de l'ammoniac atmosphérique, après oxydation des deux premiers.

Les sulfates disparaissent brusquement de la couche d'aérosols stratosphériques au-delà de 22-23 km d'altitude (Fig. 4.11). Il semble donc qu'ils apparaîtraient à ce niveau par réaction du SO_4H_2 néoformé sur l'ammoniac et qu'ils se sédimentent lentement vers le sol. Cette couche joue donc un rôle important dans le cycle biogéochimique du soufre et dans une moindre mesure dans celui de l'azote.

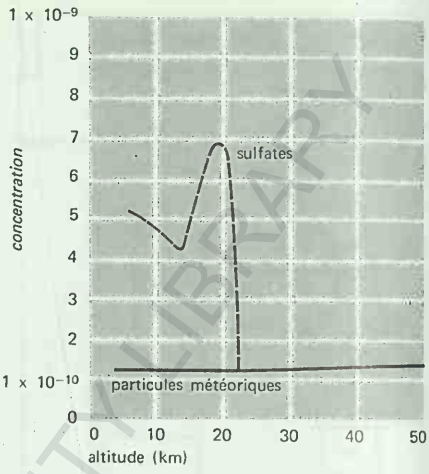


Figure 4.11
Variation du taux de sulfates et de particules météoriques en fonction de l'altitude (in *Varney et Mac Cormac, Reidel ed., 1971, p. 49).*

La production d'aérosols (au sens strict) par l'homme est très inférieure à celle de la végétation. Celle-ci dégage chaque année des quantités considérables de terpènes dans l'atmosphère. Ces particules liquides seraient responsables des brouillards bleuâtres observés par satellite au-dessus des régions tropicales, tout autant que les incendies de forêts. La concentration des aérosols dans l'atmosphère varie beaucoup en fonction de la latitude et plus généralement de la localisation géographique. Il existe en effet dans la biosphère de vastes zones où l'air est très chargé en particules et d'autres où celles-ci sont, au contraire, peu abondantes.

Les principales sources d'aérosols sont d'origine naturelle : éruptions volcaniques et érosion éolienne. C'est à celle-ci qu'il faut attribuer en premier lieu la genèse des immenses voiles de poussières brun-rouge qui s'observent au-dessus du Sahara, du Moyen-Orient, de l'Inde et de la Chine continentale.

On a pu aussi mettre en évidence des couches d'aérosols formant des brumes bleuâtres au-dessus de l'Amazonie, de l'Afrique équatoriale et de l'Asie du Sud-Est. Nous avons déjà discuté de leur origine éventuelle. Les zones fortement industrialisées d'Amérique du Nord et d'Europe sont, elles aussi, recouvertes d'un voile grisâtre de poussières (Fig. 4.12).

On ne dispose pas de beaucoup d'informations sur la quantité et la masse de particules contenues dans les aérosols formés par l'érosion éolienne. Le rôle de l'homme dans leur genèse n'est pas toujours négligeable : il suffit de songer aux immenses *dust-bowl* qui ravagèrent les terres fragiles de l'Oklahoma et autres états du centre des Etats-Unis pendant les années 30 à la suite d'une mauvaise exploitation des sols (cf. Fig. 8.12, chap. VIII).

On peut retrouver le même phénomène aux Indes et dans les régions mésogéennes désertifiées par l'homme. Bryson et Wendland (1970) rappellent, à ce propos, que de faibles modifications des couches superficielles de la lithosphère en région désertique suffisent pour provoquer une intense érosion éolienne. Ils rappellent

BOISE STATE UNIVERSITY LIBRARY

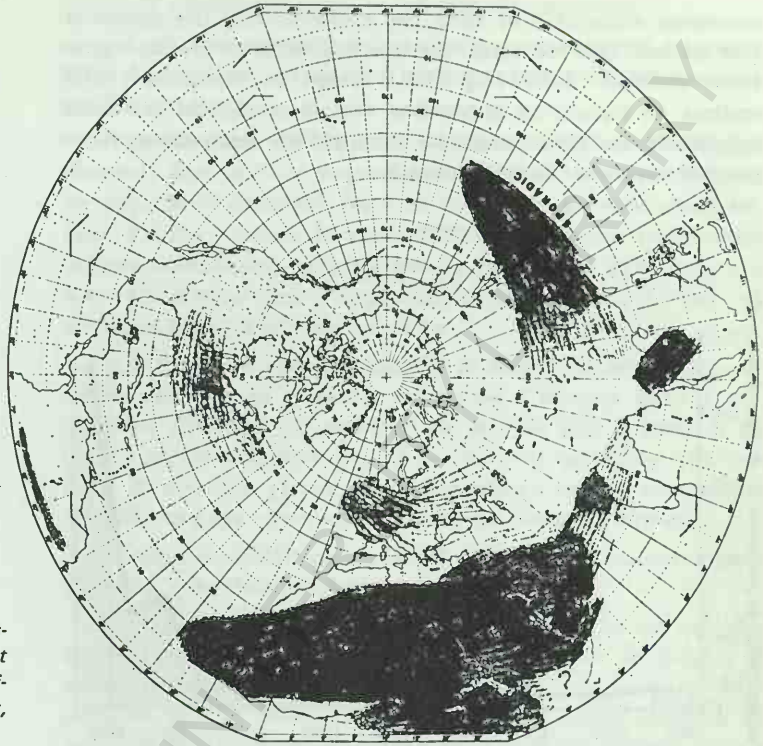


Figure 4.12
Répartition des particules solides dans l'atmosphère de l'hémisphère Nord. D'après Bryson et Wendland, in Singer "Global effects of environmental pollution" Reidel ed., Dordrecht, 1970, p. 131

que les batailles de chars qui opposèrent les troupes britanniques à l'*Afrika Korps* de Rommel dans les déserts de Libye, au cours de la seconde guerre mondiale, provoquèrent la formation de nuées de poussière qui traversèrent l'Atlantique. Celles-ci furent détectées jusque dans la mer des Caraïbes !

Croissance du taux d'aérosols dans l'atmosphère

La concentration des aérosols dans l'atmosphère présente également des fluctuations en fonction du temps. Certaines d'entre elles sont saisonnières : tempêtes de sable estivales aux Indes ou au moment de la mousson d'hiver en Chine.

Plusieurs travaux récents montrent aussi une tendance à l'accroissement du taux global d'aérosols atmosphériques depuis quelques décennies. Hodge (1971) a mesuré une diminution de 9 % du coefficient de transmission de l'atmosphère au-dessus de l'Observatoire du Mont-Wilson, aux Etats-Unis, au cours du dernier demi-siècle. On peut calculer que celle-ci correspond à un doublement de l'opacité moyenne atmosphérique pendant ce même laps de temps. Peterson et Bryson (1968) citent une augmentation de 30 % de la turbidité de l'air au-dessus des îles Hawaï entre 1957 et 1967. Davitaiia (1965) a observé une très forte tendance à l'accroissement des chutes annuelles de poussières sur les hauts sommets du Caucase. Alors que celles-ci sont restées sensiblement

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY

constantes entre 1790 et 1910, cet auteur constate une augmentation de leur taux de vingt fois dans les neiges de ces montagnes entre 1930 et 1963 (Fig. 4.13). Bryson et Wendland (1970) mettent en rapport ce phénomène avec la prodigieuse croissance industrielle de l'Union soviétique dont le PNB aurait été multiplié par quinze pendant la même période !

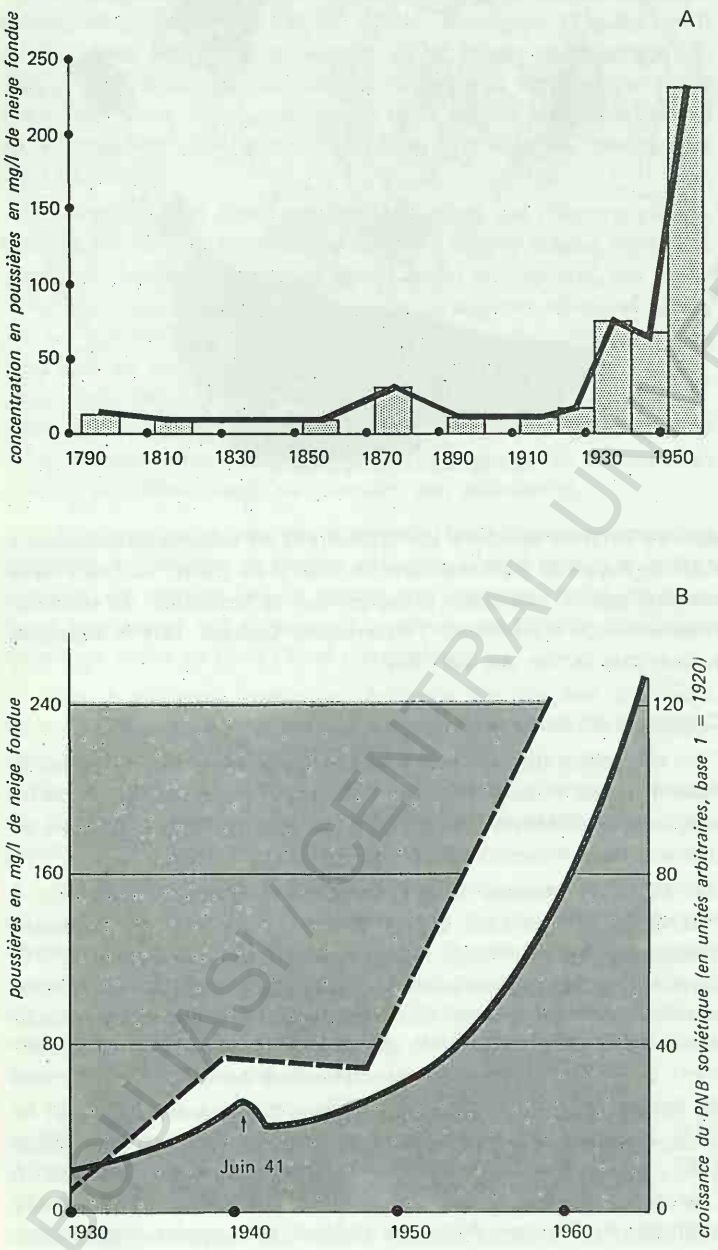


Figure 4.13
Corrélation entre la concentration en poussières dans les neiges éternelles du Haut Caucase et l'expansion de l'économie soviétique. A, d'après Davitaia, Trans. Soviet. Akad. Sci. Geog. ser., n° 2, 1965 ; B, d'après Bryson et Wendland (1970).

BOLLIASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Causes de l'augmentation de la turbidité atmosphérique

Si cet accroissement de la turbidité atmosphérique est incontesté de nos jours, les opinions divergent encore sur les causes de ces changements.

Pour certains, tels Bryson et Wendland, le facteur déterminant résiderait dans la forte augmentation d'activité de l'industrie dans les pays de l'hémisphère Nord au cours des dernières décennies. Pour d'autres, comme Mitchell (1970), c'est à des phénomènes naturels épisodiques, en particulier au volcanisme, qu'il faut attribuer en premier lieu l'augmentation de la concentration des particules dans l'atmosphère terrestre.

L'activité industrielle moderne se traduit incontestablement par la décharge de quantités croissantes d'aérosols dans la troposphère. En outre, la pollution de plus en plus importante de celle-ci par les composés gazeux du soufre et de l'azote crée *ipso facto* de nouvelles particules qui apparaissent dans la stratosphère probablement par condensation autour des noyaux d'Aitken.

Goldberg (1970) évalue à 20×10^7 t/an la quantité totale d'aérosols que l'homme injecte dans l'atmosphère.

La durée moyenne de séjour de ces particules est des plus variables selon le régime des pluies et des chutes de neige à la latitude considérée. Elle est estimée entre six jours et deux semaines dans la basse troposphère, deux à quatre semaines au niveau de la tropopause, six mois dans la basse stratosphère, trois à cinq ans à la limite de la mésosphère et de cinq à dix ans dans cette dernière (Junge, 1963).

Mitchell fixe à 36 jours le temps moyen de résidence des aérosols dans l'ensemble de l'atmosphère, ce qui lui permet d'évaluer, à partir de l'estimation de Goldberg, à 2×10^6 tonnes la quantité de poussières produites par l'homme qu'elle renferme à un instant donné.

Cet auteur a comparé cette valeur à la masse totale de cendres introduites dans la troposphère par les éruptions volcaniques au cours des 120 dernières années. Selon Mitchell, seulement 1 % de la quantité totale ainsi rejetée accéderait à la stratosphère. Dans ces conditions, il trouve que dans la période sur laquelle a porté son étude, $4{,}2 \times 10^6$ tonnes de matériaux volcaniques ont été en moyenne injectées dans la stratosphère. Cependant, le rythme de l'activité volcanique est des plus irréguliers dans l'intervalle de temps considéré. Ainsi, l'explosion du Krakatoa aurait projeté au moins 50×10^6 tonnes de cendres dans la stratosphère, celle du Mont Agung 15×10^6 tonnes (pour une quantité totale d'au moins 10^9 tonnes de particules injectées dans l'atmosphère) !

L'action de l'homme, selon les calculs de Mitchell, serait donc mineure, par rapport à celle du volcanisme, puisqu'il n'introduirait en définitive, en moyenne, dans l'atmosphère que 2×10^6 tonnes d'aérosols, alors que les volcans en injectent $4{,}2 \times 10^6$ tonnes (1) dans la seule stratosphère,

(1) Il s'agit, dans un cas comme dans l'autre, de la quantité instantanée présente dans l'air, calculée en tenant compte du temps de séjour moyen des particules.

BU IASI / CENTRE DE DOCUMENTATION

Certes, on a pu enregistrer depuis 1947, date d'éruption du Mont Hekla en Islande, un très net regain de l'activité volcanique, après une période de repos d'une trentaine d'années au cours de laquelle aucune éruption, égale ou supérieure à la deuxième magnitude, n'avait été observée (Fig. 4,14).

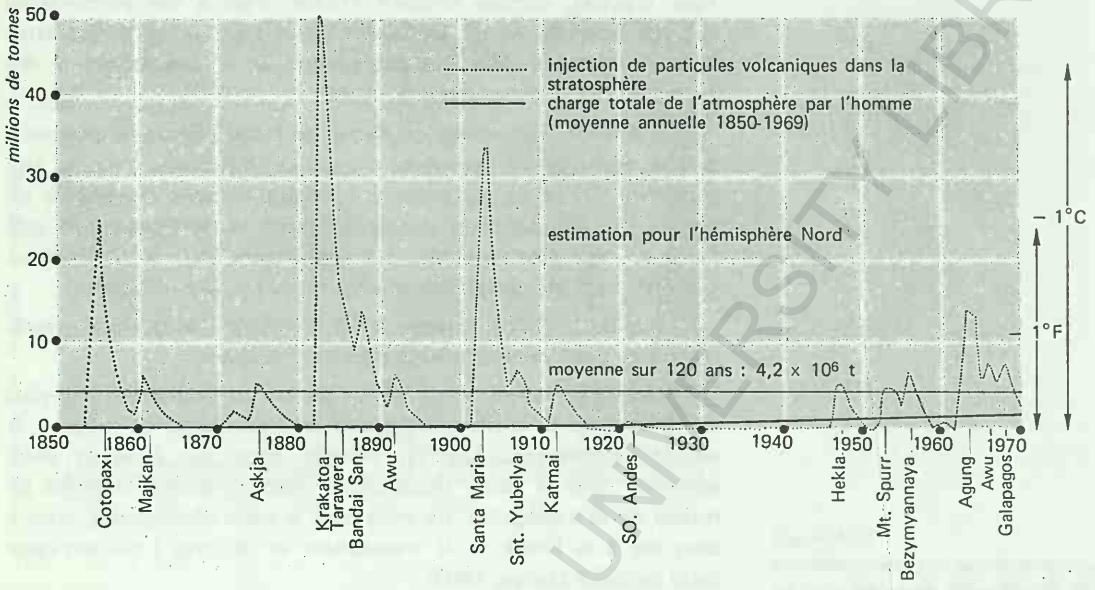


Figure 4.14
Estimation des fluctuations présentées au cours des 120 dernières années de la quantité de particules volcaniques injectées dans la stratosphère ainsi que de celle des aérosols rejetés dans l'ensemble de l'atmosphère par l'activité humaine. A droite sont figurées les masses de poussières susceptibles de provoquer une baisse des températures moyennes de 1° F et 1° C à la surface du globe. D'après Mitchell in *Singer, 1970, p. 146*

Cela n'exclut pas pour autant le rôle croissant de la civilisation technologique dans la création d'aérosols. On a pu récemment administrer une preuve directe de la contamination par l'homme de la couche de particules stratosphériques. L'étude du rapport chlore/brome dans les poussières prélevées à cette altitude montre qu'il est seulement égal au vingtième de sa valeur dans l'eau de mer. Caddle et coll. (1970) attribuent la déviation considérable de ce coefficient, par rapport à sa valeur dans les conditions naturelles, à un enrichissement de la couche particulaire stratosphérique en aérosols émis par les gaz d'échappement des automobiles (lesquels contiennent du brome). La présence de poussières plombiques dans la stratosphère apporte une preuve complémentaire de sa pollution par l'homme.

Rizebrough et coll. (1968) voient dans la présence de 14 ppb de DDT dans les particules qui se sédimentent au-dessus des îles Barbades une autre confirmation du rôle croissant de la civilisation moderne dans la contamination de l'atmosphère par des aérosols. Ces auteurs font remarquer fort à propos, que cet insecticide ne représente qu'une part infime de la quantité totale des particules rejetées dans l'air.

UNIVERSITY LIBRARY

Enfin, outre l'industrie, l'érosion des sols provoquée par une exploitation intempestive des terres marginales dans les régions surpeuplées de la biosphère joue sans aucun doute un rôle important, quoique peu étudié, dans l'augmentation de la charge moyenne en particules de l'atmosphère.

Das (1962) a mis en évidence au Rajasthan, dans le nord-est des Indes, zone aride incontestablement créée par l'homme, l'existence d'un phénomène d'érosion éolienne auto-entretenu. Au fur et à mesure que le surpâturage diminue le couvert végétal, la charge particulaire de la troposphère s'accroît de façon accélérée dans cette région.

Il serait toutefois erroné de limiter ces phénomènes aux seules régions de culture marginale — ou de surpâturage — du tiers monde. Schaeffer (1970) signale aussi une formation de très considérables nuages de poussière par érosion éolienne dans les plaines occidentales des Etats-Unis comprises entre le Mississipi et les premiers contreforts des Rocheuses. Il a observé par avion dans ces régions une zone de 450 km de longueur dans laquelle l'atmosphère était chargée de cristaux de glace, provoqués par les importants tourbillons de particules s'élevant en tempête au-dessus des champs de blé cultivés dans cette contrée. Schaeffer fait en outre remarquer l'absence d'aérosols dans les régions de pâturage qui jouxtent ces zones de grande culture, sur le versant oriental des Rocheuses.

L'utilisation agricole des sols constitue donc aussi, en certaines circonstances, une source importante de particules atmosphériques, non seulement dans les pays du tiers monde mais aussi dans les nations "développées".

EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LES ECOSYSTEMES

Conséquence climatiques

Il existe une interaction importante entre la pollution atmosphérique et les facteurs climatiques.

A l'échelle locale ou régionale, le relief, le sens des vents, l'ensoleillement, la pluviométrie interviennent dans un sens ou dans l'autre pour déterminer l'intensité de la contamination de l'air.

A l'opposé, lorsque les niveaux de pollution sont assez intenses, les principaux facteurs météorologiques peuvent être modifiés — ainsi, par exemple, la baisse du flux lumineux au sol est directement dépendante du nombre de jours de brouillards (smogs) en milieu urbain.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Evidents depuis longue date au niveau des microclimats, *les effets climatiques globaux* de la pollution atmosphérique demeurent en revanche fort controversés, aujourd'hui encore. Cependant, le nombre de sceptiques devient de plus en plus réduit parmi les météorologistes, au fur et à mesure que la finesse des techniques actuelles en bioclimatologie et des méthodes modernes de calcul numérique permettent de mieux apprécier des changements, jusqu'alors imperceptibles, et de prévoir les effets des variations de tel ou tel paramètre sur le climat terrestre.

En réalité, le problème est extrêmement complexe. En effet, s'il est difficile de nos jours de nier qu'une élévation du taux de gaz carbonique dans l'air ou qu'une augmentation de la concentration atmosphérique des poussières n'interfèrent pas avec l'équilibre radiatif de l'atmosphère, de nombreux écarts subsistent encore dans l'évaluation quantitative des effets produits sur les températures au sol.

Il est, par ailleurs, très malaisé de mettre en rapport les incontestables modifications climatiques observées depuis un siècle avec l'ensemble des perturbations induites par l'homme dans l'atmosphère.

EFFETS SUR LES MACROCLIMATS

La température moyenne au niveau du sol dépend, avant tout autre facteur, de la quantité d'énergie reçue par chaque unité de surface terrestre.

Soit I_0 l'intensité du flux solaire avant la traversée de l'atmosphère, I l'intensité au niveau de la mer, α_a le coefficient d'absorption pour l'ensemble des gaz présents dans l'air, α_s le coefficient de réflexion des radiations par ces gaz et α_d le coefficient de turbidité qui rend compte de l'absorption et de la réflexion par les particules, enfin m la cosécante de l'angle du soleil par rapport au zénith. On démontre que l'intensité des rayons accédant au sol est donnée par la relation :

$$I = I_0 \, e^{-(\alpha_a + \alpha_s + \alpha_d)m} \qquad (9)$$

D'après cette dernière, nous voyons que I dépend, outre de m (qui est fonction de la latitude et de l'heure), de tout un ensemble de phénomènes d'absorption et de réflexion par les gaz et les aérosols, lesquels interviennent de façon déterminante dans l'ajustement de la température des basses couches troposphériques.

La plupart des gaz atmosphériques sont transparents aux radiations et présentent de la sorte un coefficient d'absorption nul. En revanche, le gaz carbonique, la vapeur d'eau et l'ozone qui sont des corps composés, absorbent une partie importante du spectre solaire, en particulier dans l'infra-rouge, radiations transportant une grande énergie thermique (Fig. 4.15).

La couche d'ozone absorbe environ 5 % du flux solaire incident. Malgré sa forte dilution dans l'air (325 ppm), le gaz

RCU MASTER CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

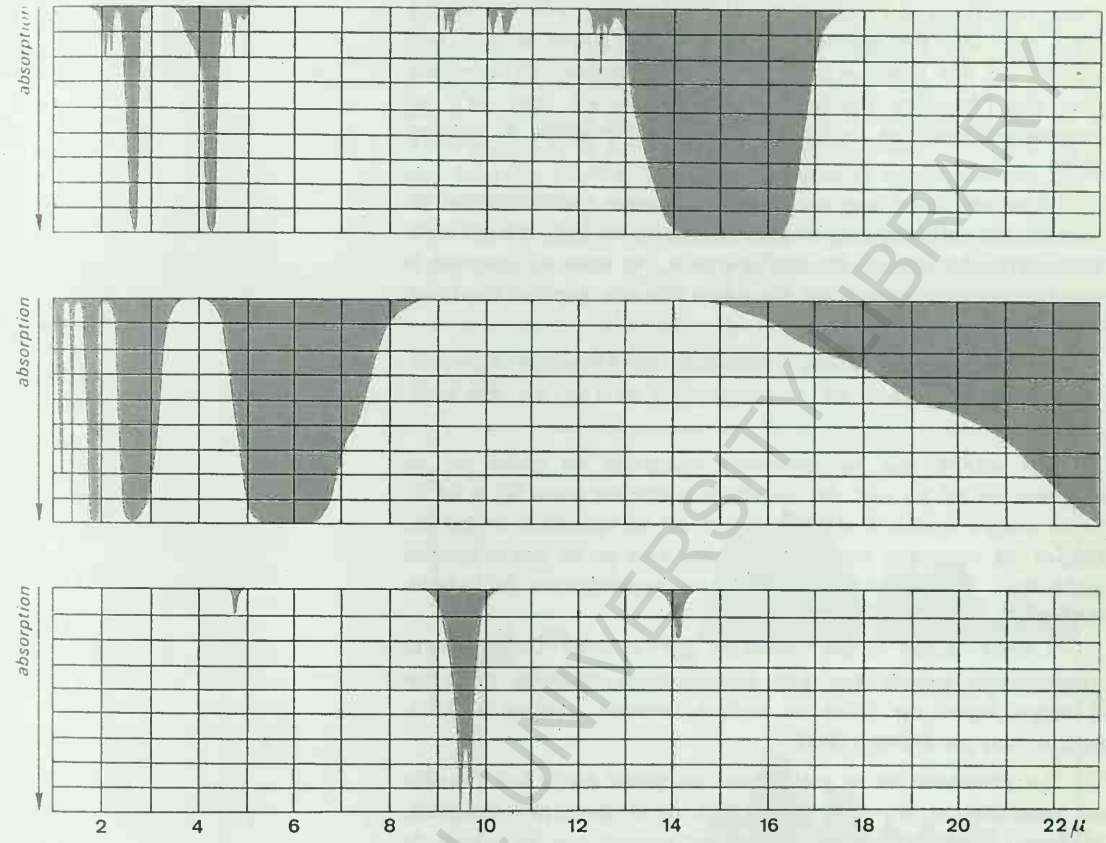


Figure 4.15
Spectres d'absorption dans l'infra-rouge : du CO_2 (en haut), de la vapeur d'eau (au centre) et de l'Ozone (en bas). D'après Plass, Scientific Amer., juillet 1959

carbonique constitue un remarquable absorbeur de l'infra-rouge entre 12 et 18 μ de longueur d'onde. Aux taux actuels auxquels il se rencontre dans l'atmosphère, il retient toute l'énergie correspondant à la bande comprise entre 14,5 et 15,5 μ et une partie croissante de celle située en deça et au-delà (Broecker et coll., 1971) jusqu'aux limites précitées. Le gaz carbonique présente en conséquence un "effet de serre". Il agit en quelque sorte comme la vitre d'une serre qui piège les radiations calorifiques, élevant de la sorte la température de la basse troposphère.

La vapeur d'eau, qui absorbe aussi fortement l'infra-rouge, contribuerait également, selon Möller (1963), à élever la quantité d'énergie reçue à ce niveau. Cet auteur a pu calculer qu'une augmentation de 10 % du taux de vapeur d'eau atmosphérique diminuerait de 1,0 m cal/cm^2/mn le total des radiations absorbées mais de 3,5 m cal/cm^2/mn celle perdue par la basse troposphère, soit un effet net qui se traduit par un accroissement de 2,5 m cal/cm^2/mn de la quantité d'énergie reçue par chaque cm^2 de surface terrestre.

Le problème est en réalité beaucoup plus complexe qu'il n'apparaît au premier abord. Les travaux récents montrent que les

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

effets relatifs du gaz carbonique et de la vapeur d'eau atmosphérique ont mal été estimés par Möller et d'autres auteurs plus anciens. Ils ont effectué leurs calculs en ne prenant en considération que l'équilibre thermique au niveau du sol alors qu'il est nécessaire d'examiner les phénomènes dans l'ensemble de l'atmosphère.

Il existe d'une part une interaction entre l'accroissement du taux de gaz carbonique et l'humidité relative de l'air, d'autre part, entre cette dernière et les coefficients α_a et aussi α_s, puisque la nébulosité atmosphérique est elle-même liée à la quantité de vapeur d'eau qu'elle renferme.

L'action de la couverture nuageuse sur l'intensité des radiations incidentes, donc sur la température de l'air, est très complexe.

On estime que la couverture nuageuse du globe est en moyenne de 52 %, avec des variations comprises entre 50 et 54 %. Si les nuages tendent à réfléchir vers le sol les radiations émises par celui-ci, ils renvoient aussi vers l'espace une partie des radiations incidentes ; ils induisent de la sorte une augmentation de l'albedo terrestre.

L'effet global d'une élévation de 1 % de la nébulosité moyenne se traduit par une baisse de la quantité moyenne d'énergie reçue par unité de surface terrestre, évaluée à 0,8 m cal/cm^2/mn par Möller (1963).

Le problème est en réalité plus complexe car il faut prendre en considération la nature et l'altitude de la couverture nuageuse. Manabe (1970) et d'autres auteurs ont montré que les calculs de Möller étaient valables pour les nuages des basses couches troposphériques qui présentent un fort albedo et une opacité importante du flux incident. En revanche les cirrus situés dans la haute troposphère et dans la stratosphère, dont l'albedo est tout au plus de l'ordre de 20 %, auraient un effet inverse et tendraient à augmenter les températures au voisinage du sol.

Enfin, les changements dans la température, le taux de vapeur d'eau atmosphérique et la nébulosité peuvent aussi affecter l'étendue des régions enneigées, donc modifier fortement la valeur de l'albedo terrestre puisque la neige réfléchit vers l'espace 90 % des radiations incidentes.

L'intensité du flux solaire au niveau du sol est aussi conditionnée par la turbidité atmosphérique (coefficient α_d). L'action des poussières sur la quantité d'énergie reçue par unité de surface est difficile à préciser. Cela dépend en grande partie de la nature des aérosols. Si le coefficient de réflexion moyen est plus grand dans l'infra-rouge que dans le visible, les températures au sol s'élèveront. Elles décroîtront dans l'hypothèse inverse. Mais l'absorption intervient aussi dans le coefficient α_d. En effet, les particules captent une partie de l'énergie reçue. Là encore, l'altitude de la couche d'aérosols joue un grand rôle. Dans le cas de particules situées au

ECOLE NATIONALE UNIVERSITY LIBRARY

niveau stratosphérique, l'absorption provoquera un réchauffement à ce niveau et un refroidissement au sol. Ces considérations ont été confirmées par l'étude des variations de températures consécutives à l'éruption du Mont Agung, en 1963. Cette dernière a projeté au moins 15 millions de tonnes de cendres volcaniques au-delà de la troposphère. A la suite de cette éruption, Newell (1970) a relevé une élévation de 6 à 7° C de la température stratosphérique, entre 16 et 20 km d'altitude, dans les régions équatoriales comprises entre les 15e degrés de latitude nord et sud. Cette température est restée supérieure de 2 à 3° C à sa valeur moyenne plusieurs années après le réveil du volcan. Simultanément, Newell a mis en évidence une diminution significative de la température dans les couches troposphériques situées au-dessous de 10 km de hauteur (cf. Fig. 4.16).

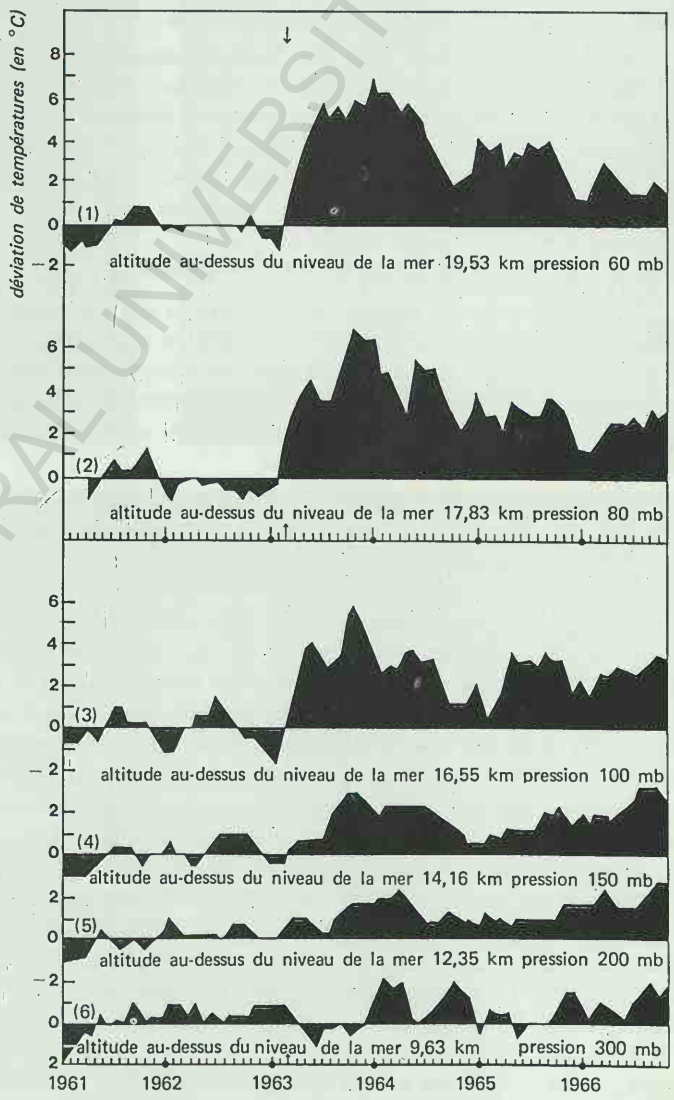


Figure 4.16
Effets de l'éruption du Mont Agung en mars 1963, sur les températures de la troposphère et de la basse stratosphère au-dessus de Port Hedland, en Australie. La flèche indique le début de l'entrée en activité du volcan. Les particules injectées dans la stratosphère ont provoqué une nette élévation de température à ce niveau et corrélativement une baisse significative des températures de la troposphère, au-dessous de 10 km d'altitude. D'après Newell in M I T, 1970, "Man's impact on the global environment", p. 105

PU / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Toute modification physico-chimique de l'atmosphère agira sur la valeur des coefficients α_a, α_d et α_s (formule 9), donc sur l'intensité du flux solaire aux diverses latitudes. Elle provoquera en conséquence des changements climatiques.

L'action de l'homme sur la biosphère se traduit par divers processus qui interfèrent avec les coefficients α et perturbent donc les phénomènes d'absorption, de diffusion et de réflexion dans l'atmosphère. La civilisation contemporaine introduit dans l'air des quantités croissantes d'aérosols, soit au niveau des agglomérations industrielles, soit en provoquant de l'érosion éolienne dans les zones désertiques ou semi-arides. La technologie moderne enrichit l'air en gaz carbonique ; elle injecte de la vapeur d'eau dans la haute troposphère et la stratosphère, ce qui se traduit par la formation de traînées de condensation, consécutives au vol des avions à réaction dans ces couches atmosphériques.

Mais l'homme modifie aussi par d'autres modalités l'intensité des radiations réfléchies par la surface terrestre : l'urbanisation incessante, la mise en culture de sols initialement boisés, la création d'immenses lacs de barrages artificiels agissent aussi sur l'albedo des territoires ainsi aménagés, bien que ces facteurs revêtent une importance secondaire par rapport à ceux que nous avons cités.

Planche XIII

Traînées de condensation formées par les avions à réaction aux environs de l'aéroport d'Orly

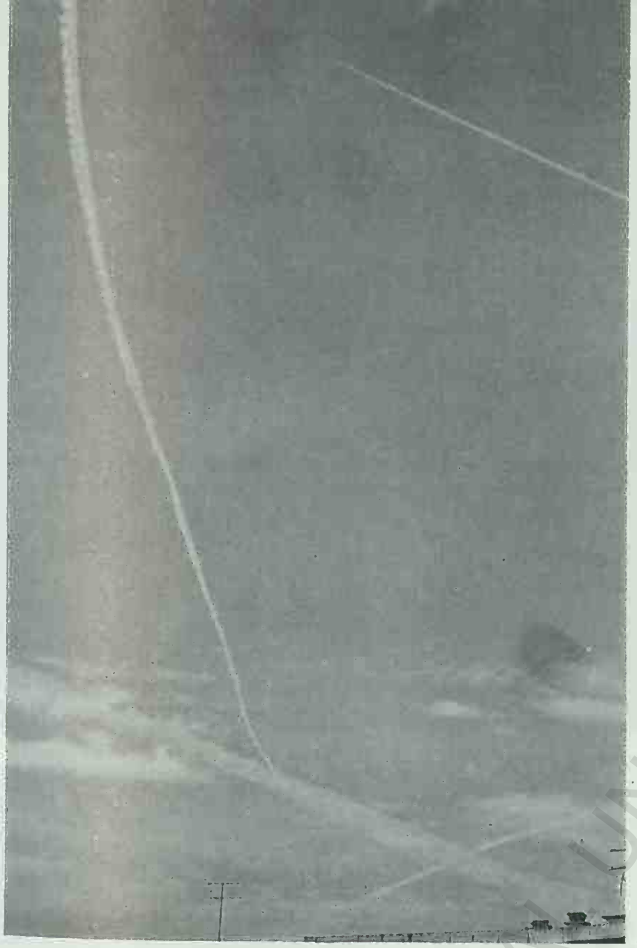
Les photographies 1, 2 et 3 ont été prises à 20 minutes d'intervalle à partir de 10 h du matin, en hiver par beau temps sans aucune nébulosité naturelle. Remarquer l'étalement progressif des traînées de condensation, initialement très étroites, sous l'effet des vents d'altitude. Elles se transforment ainsi peu à peu en voiles de cirrus très étendus. Le jour où ces clichés ont été pris, elles recouvraient à midi 70 % de la voûte céleste (Clichés F. Ramade). →

Effets du gaz carbonique sur les températures globales

La production et la mise en œuvre d'énergie par des moyens artificiels (combustion des hydrocarbures, réacteurs nucléaires) et la perte de chaleur qui en résulte — laquelle est dissipée dans l'environnement — pourraient aussi agir sur le bilan radiatif de la surface terrestre. Le rayonnement infra-rouge des diverses sources technologiques d'énergie est en effet très intense.

L'accroissement du taux de gaz carbonique dans l'air peut constituer un élément perturbateur du climat d'importance considérable. L'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique d'origine industrielle ne peut que renforcer "l'effet de serre". Nous avons vu que si l'atmosphère est à peu près transparente au flux solaire incident, elle est en revanche à peu près opaque aux radiations infra-rouges émises et réfléchies par la surface des océans ou des continents. A cause de ce phénomène, les rayonnements de cette bande spectrale, que l'atmosphère renvoie vers le sol, contribuent à maintenir la température de l'air au voisinage de sa surface à une valeur nettement supérieure à celle qu'elle devrait présenter en son absence. L'expérience confirme cette interprétation. La température moyenne de l'air à la surface terrestre (T_s) est actuellement de l'ordre de 13° C (soit 286 K). On peut considérer que le système sol-océan-atmosphère est en équilibre radiatif avec le soleil, c'est-à-dire qu'il existe une exacte compensation entre l'énergie perdue par rayonnement vers l'espace et celle apportée par le flux solaire. Il est alors possible de déterminer une température d'émission de la surface terrestre, T_e, qui est liée à l'albedo planétaire, au flux solaire et à la constante de Bolzman. Le calcul

BOTANY UNIVERSITY LIBRARY



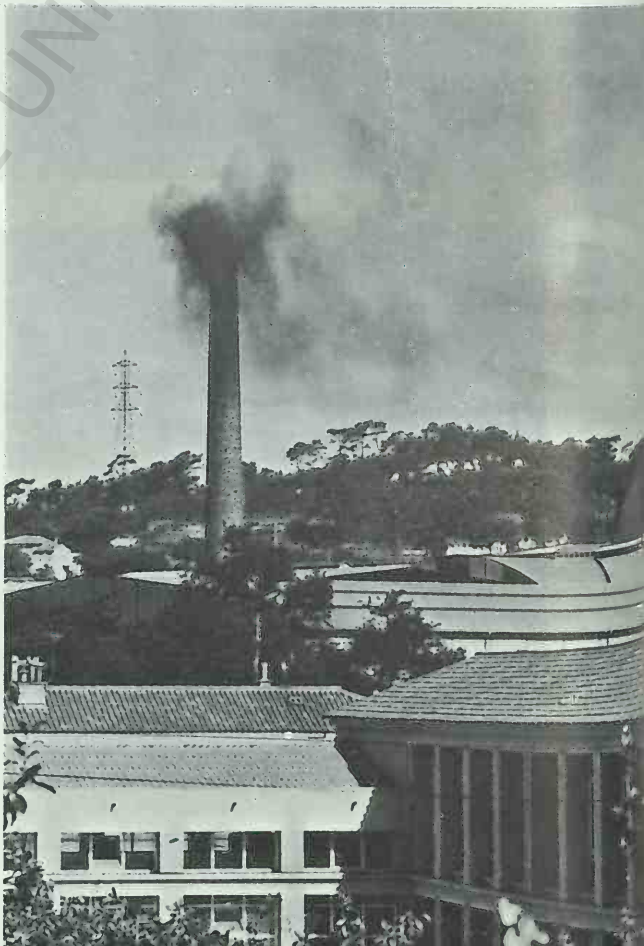
1

2

3

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

1



2

Planche XIV

Pollution atmosphérique d'origine industrielle

1) Fumées du complexe pétrochimique de Lavera en bordure du golfe de Fos

2) La cheminée de cette usine de la région marseillaise fume abusivement

Le groupe scolaire du premier plan est situé sous les vents dominants.

A l'encontre de divers propos lénifiants, la photographie (1) de la planche XIII montre qu'il serait vain de compter sur le mistral pour préserver de la pollution les populations des villes riveraines du "grand delta". En effet, le vent souffle du SE et non en direction de la mer près de cent jours par an dans cette région.

ROOT / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

montre que T_e est de l'ordre de $-20°$ C (253 K), valeur corroborée par les récentes mesures effectuées grâce aux satellites. Le rapport T_s / T_e, appelé *coefficient de serre,* est égal à 1,13 pour le système surface terrestre-atmosphère.

Plusieurs auteurs ont essayé de déterminer quelles modifications climatiques pourraient résulter de l'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique provoqué par l'activité humaine.

Le célèbre savant suédois Svante Arrhenius calculait dès 1896, qu'une multiplication par trois du taux de gaz carbonique atmosphérique se traduirait par une élévation de 9° C de la température moyenne terrestre au niveau du sol.

Plass (1959) a utilisé pour la première fois un calculateur électronique pour déterminer les conséquences d'une élévation de la concentration du gaz carbonique dans l'air. Il a trouvé qu'un doublement de celle-ci provoquerait une hausse de 3,6° C de la température moyenne superficielle du globe alors qu'une baisse de 50 % du taux de ce gaz se traduirait par une diminution de 3,79° C de cette dernière. Plass souligne que de telles variations thermiques seraient suivies, dans un cas comme dans l'autre, de véritables bouleversements bioclimatiques.

L'augmentation de 3,6° C de la température moyenne des couches les plus basses de la troposphère provoquerait la fonte d'une partie importante des calottes glaciaires polaires avec élévation corrélative du niveau des océans. Leur baisse de 3,79° C s'accompagnerait au contraire du retour d'une nouvelle période de glaciation.

Il est bien connu que les époques glaciaires se sont succédées avec une certaine régularité au cours de l'histoire de la biosphère. Divers travaux ont révélé que depuis les lointaines époques antécambriennes, le climat tropical de la terre a été entrecoupé de périodes glaciaires qui se sont succédées environ tous les 250×10^6 ans (Plass, 1959). De plus, chacune de ces époques présente un cycle alterné de réchauffement et de refroidissement. Ainsi, au cours des 620 000 dernières années de l'époque glaciaire actuelle, on distingue dix cycles thermiques très nets.

Ces diverses considérations ont conduit Plass à élaborer une nouvelle théorie pour expliquer le caractère cyclique des époques glaciaires. Cet auteur fait remarquer qu'à leur maximum d'intensité, près de 10 % du volume total de l'hydrosphère seraient sous forme de glace, laquelle retient beaucoup moins de gaz carbonique que l'eau liquide. Les océans, dont la capacité serait réduite d'autant, libèreraient alors lentement dans l'atmosphère l'excès de gaz carbonique dissous qu'ils renferment, d'où accroissement de l'effet de serre, réchauffement général du globe et fin de la période glaciaire. La fonte des banquises et l'élévation du volume des mers qui en résulterait seraient alors suivies d'une réabsorption partielle du gaz carbonique atmosphérique, d'une diminution du rayonnement infrarouge de la basse troposphère, de nouvelles glaciations, etc.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le caractère cyclique du phénomène résulterait du fait que le système n'atteindrait jamais un état stable. La croissance ou la fonte des glaciers ne sont effectivement jamais en phase avec les fluctuations de la concentration du gaz carbonique dans l'air, par suite du temps de latence nécessaire à l'établissement d'un nouvel état d'équilibre entre la concentration océanique et atmosphérique de ce gaz.

Plass suggère aussi que la tendance sensible à la baisse des températures de l'ensemble de la biosphère, qui semble s'être manifestée au cours du Paléozoïque, résulterait de l'absorption par le luxuriant manteau végétal, qui couvrait alors les terres émergées, d'une partie importante du gaz carbonique atmosphérique. Celui-ci a été stocké dans la lithosphère sous forme de diverses variétés organiques ou minérales du carbone fossile, avec une diminution corrélative de sa concentration dans l'air, donc de l'effet de serre.

Plusieurs auteurs ont tenté d'évaluer l'incidence de l'accroissement prévu du taux de gaz carbonique atmosphérique d'ici l'an 2000 sur la température moyenne terrestre, ainsi que celle d'un doublement de cette concentration.

Les résultats varient beaucoup selon le nombre de paramètres liés à cette concentration pris en considération dans ces calculs.

Möller (1963) tient compte de la couverture nuageuse moyenne et aussi de la compétition entre vapeur d'eau et gaz carbonique dans l'absorption de l'infra-rouge. Il a pu calculer de la sorte qu'une élévation de 10 % de la teneur de l'air en gaz carbonique faisait croître la température moyenne globale au niveau du sol de 0,15° C.

Un doublement du taux de gaz carbonique provoquerait, selon Möller, une élévation de 1° C de la température moyenne à la surface du globe.

Manabe et Wetherald (1967) ont étudié sur ordinateur, à l'aide de modèles analogiques tridimensionnels de l'atmosphère, la dépendance de la température ambiante et de la concentration du gaz carbonique dans l'air. Ces auteurs se sont fondés sur un état d'équilibre radiatif de l'atmosphère compte tenu non seulement de la concentration en anhydride carbonique, mais aussi de celle en vapeur d'eau et en ozone, ainsi que de la nébulosité. Ils insistent beaucoup sur les grandes différences de résultats auxquels conduisent les calculs, selon que ces derniers sont effectués à hygrométrie absolue ou à hygrométrie relative constantes. Comme l'effet de serre dépend aussi de la concentration de la vapeur d'eau dans l'air, la température d'équilibre de l'atmosphère pour une distribution donnée de l'humidité relative serait, selon ces auteurs, deux fois plus sensible à un changement de concentration en gaz carbonique que celle calculée pour une distribution correspondante de l'humidité absolue.

Figure 4.17
Changements prévisibles de la température troposphérique en fonction de l'accroissement de la teneur en CO_2 de l'atmosphère. Courbe en pointillé établie en supposant constante l'humidité absolue de l'air, courbe en trait continu calculée à humidité relative constante. D'après Rasool et Schneider in *Science, vol 173, 1971, p. 138*

SOUTH CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Ces diverses considérations conduisent Manabe (1970) à conclure que l'augmentation prévue pour le taux de gaz carbonique atmosphérique d'ici l'an 2000 (soit une élévation de 325 à 380 ppm), devrait se traduire par un accroissement de 0,8° C de la température moyenne globale au sol (1).

Manabe et Wetherald (1967) ont aussi calculé grâce à leur modèle que le doublement du taux actuel de gaz carbonique dans l'air devrait provoquer une élévation de 2,36° C de cette température dans le cas où l'on fait le calcul avec une distribution constante de l'humidité relative contre 1,33° C si l'on se réfère au contraire à une distribution constante de l'hygrométrie absolue.

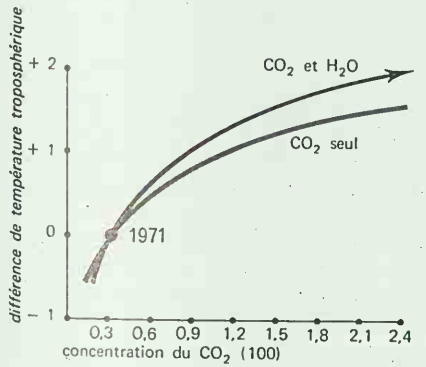
Plus récemment, Rasool et Schneider (1971) ont utilisé un modèle d'atmosphère différent de celui de Manabe pour étudier l'action d'un accroissement de la teneur en gaz carbonique sur les températures troposphériques. Ces auteurs considèrent qu'ils se produit une atténuation de l'effet de serre lorsque la concentration du gaz carbonique augmente dans l'air, par suite d'une saturation de la bande d'absorption la plus efficace dans l'infra-rouge ($\lambda = 15\,\mu$). Ils ont pu calculer, compte tenu de ce phénomène, que le doublement de la teneur atmosphérique en gaz carbonique n'élèverait que de 0,6 K la température moyenne au sol, que sa multiplication par trois l'augmenterait de 1 K, par dix de 2,5 K (Fig. 4.17).

A court terme, ces auteurs prévoient une élévation de 0,1 K seulement de cette température d'ici l'an 2000, pour un accroissement de 10 % de la concentration du gaz carbonique dans l'air au cours des prochaines décennies (2).

Il apparaît donc une certaine divergence entre les diverses tentatives effectuées pour déterminer les effets climatiques de l'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique ; toutes concluent certes à une inéluctable élévation de la température mais de grands écarts subsistent entre les estimations des différents auteurs. Ainsi, varient-elles d'un facteur 4 entre les données de Rasool et Schneider (hausse de 0,6 K de température moyenne au niveau du sol) et celle de Manabe et Wetherald — hausse de 2,3° C — pour un doublement de la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère.

La critique générale que l'on peut adresser à ces diverses évaluations réside dans leur caractère lacunaire eu égard aux paramètres pris en considération. Aucune d'entre elles ne tient compte de l'ensemble des phénomènes qui interviennent pour ajuster la température de l'air aux diverses altitudes et latitudes. En particulier, aucune ne prend en considération l'aspect dynamique des phénomènes météorologiques. Elles négligent de la sorte les mouvements de l'atmosphère qui mélangent les couches d'air des différentes altitudes et agissent ainsi sur le gradient thermique de façon à réduire les différences de température existantes.

(1) En revanche, par suite de cette opacité du CO_2 aux rayons infra-rouge, on peut aussi calculer, comme l'ont fait Manabe et Wetherald, que l'accroissement de sa teneur dans l'air provoque un refroidissement important des hautes couches stratosphériques.



(2) Cet accroissement est assez modeste par rapport aux estimations des spécialistes du CO_2 atmosphérique qui prévoient une hausse de 18 % de son taux dans l'air d'ici la fin du siècle.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Effets des aérosols d'origine industrielle

L'effet de l'augmentation du taux de gaz carbonique atmosphérique est contrebalancé par un phénomène antagoniste : l'injection de quantités sans cesse accrues de particules dans la troposphère et la stratosphère par l'industrie moderne. Selon Rasool et Schneider, un accroissement d'un facteur 4 de la concentration moyenne des aérosols dans l'ensemble de l'atmosphère terrestre — lequel ne peut être exclu au cours du prochain siècle — pourrait se traduire par une baisse de 3,5 K de la température au niveau du sol. Maintenue pendant plusieurs années, une telle diminution de la température terrestre pourrait provoquer le retour d'une nouvelle période glaciaire.

Il existe d'ailleurs plusieurs observations concrètes qui corroborent ces résultats théoriques. Outre l'effet de l'éruption du Mont Agung, déjà cité, Mitchell (1970) rappelle que la température moyenne superficielle du globe aurait baissé de 1° C au cours de l'année consécutive à l'explosion du Krakatoa en 1883.

Ce dernier auteur a tenté de prévoir les variations à venir de la température globale qui résultent de l'influence combinée de l'augmentation du taux de gaz carbonique et de la charge en particules atmosphériques (Fig. 4.18). Mitchell trouve que si l'on adopte un temps de doublement de 23 ans pour la concentration du gaz carbonique dans l'air et de 10 ans pour celui des poussières, l'influence de ces deux facteurs se neutraliserait avec une légère baisse de la température au sol en l'an 2000 par rapport à sa valeur actuelle. Mais si dans ces mêmes conditions, on envisage un effet thermique des particules de valeur double de celle considérée comme la plus vraisemblable, le refroidissement induit l'emporterait sur le réchauffement provoqué par le gaz carbonique en excès et

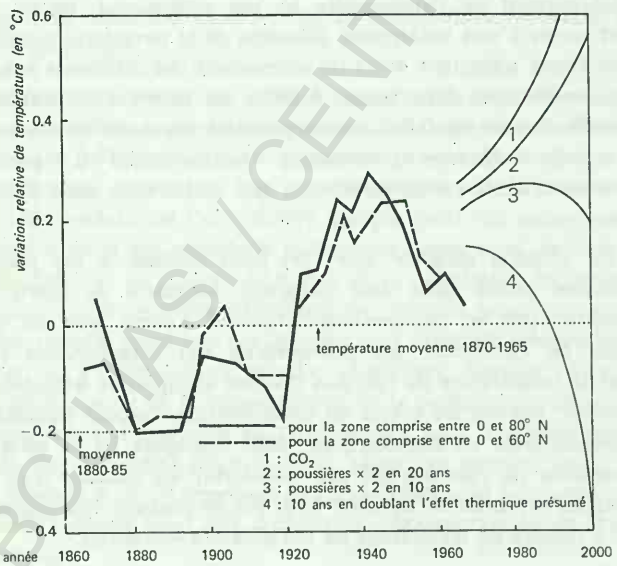


Figure 4.18
Changements des températures moyennes à la surface du globe entre 1870 et 1965. En trait continu, les variations observées entre le 80° N et l'équateur, en pointillé entre le 60° N et l'équateur. Les courbes de droite représentent l'évolution prévisible de la température moyenne superficielle en ne tenant compte que de l'enrichissement en CO_2 (1), en supposant que le taux de particules stratosphériques double en 20 ans (2) ou en 10 ans (3), et en bas (4) la baisse de température que l'on peut prévoir si le taux de particules double en dix ans avec une influence thermique double de la valeur estimée comme la plus probable. D'après Mitchell in *Singer, Reidel ed. 1970, p. 142 mais modifié.*

ROMASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

les températures au sol baisseraient progressivement jusqu'en l'an 2000 où elles atteindraient — 0,5° C par rapport à la moyenne de 1970.

Le réchauffement de l'ambiance, qui accompagne de façon inéluctable les divers processus de production et de consommation de l'énergie (entropie) constitue un autre facteur par lequel la civilisation contemporaine peut modifier le climat au voisinage du sol. A quel point la chaleur ainsi perdue dans l'environnement peut-elle devenir un facteur climatique significatif ? Cette influence, indiscutable au niveau du mésoclimat, en particulier en milieu urbain, paraît aujourd'hui encore aléatoire à l'échelle globale. Il faut tout de même préciser qu'en certaines zones densément industrialisées, l'échauffement atmosphérique qui en résulte peut prendre une certaine importance. Lees (1970) a pu calculer que dans le bassin de Los Angeles, qui couvre plus de 10 000 km^2, cette énergie supplémentaire d'origine technologique correspond à plus de 5 % du flux solaire incident et devrait croître jusqu'à 18 % de cette valeur d'ici la fin du siècle (Fig. 4.18). D'autres évaluations effectuées dans la région nord-est des Etats Unis, qui couvre quelque 900 000 km^2, montrent que la chaleur libérée par des sources industrielles ou domestiques dans le milieu est déjà égale à 1 % de l'énergie solaire incidente et qu'elle atteindra 5 % en l'an 2000 !

L'homme agit non seulement sur la température atmosphérique de façon directe ou indirecte mais aussi sur son hygrométrie. L'action de la technologie moderne pourrait donc aussi provoquer une modification de l'ensoleillement à la surface du globe, ainsi que des changements qualitatifs dans la nature du spectre solaire au niveau de la basse troposphère.

Si l'injection de vapeur d'eau d'origine artificielle ne représente pas un phénomène significatif, eu égard aux quantités considérables présentes dans les régions inférieures de l'atmosphère, il n'en est plus de même au niveau de la tropopause et *a fortiori* de la stratosphère.

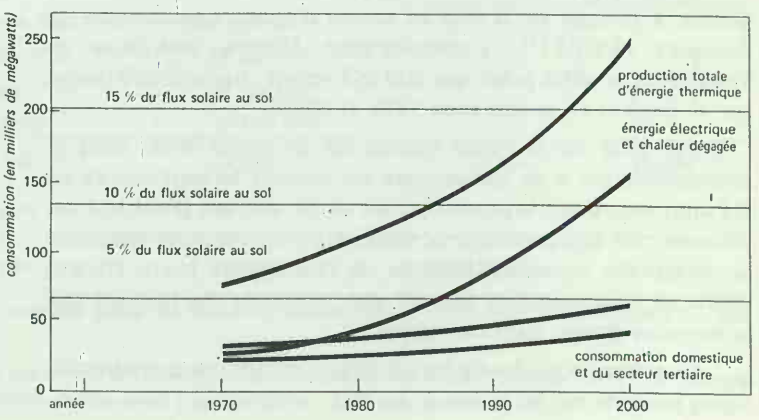


Figure 4.18a
Quantité d'énergie ajoutée au flux solaire par l'activité humaine dans le bassin de Los Angeles dans la période 1970-2000. D'après Lees in *M I T, 1970, p. 138*

PAU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les vols d'avions à réaction dans ces diverses couches atmosphériques peuvent modifier localement leur hygrométrie, donc la nébulosité à ces altitudes, ce qui diminuerait l'ensoleillement à la surface du sol (cf. Pl. XIII).

Les conditions qui provoquent l'apparition des traînées de condensation des gaz à la sortie des réacteurs sont réunies dans la haute troposphère où règnent simultanément de faibles températures et une forte humidité relative. Tous ces facteurs facilitent une modification artificielle de la nébulosité dans ces régions, d'autant plus que la vapeur d'eau séjourne assez longtemps à de telles altitudes avant d'être ramenée à la surface par les précipitations.

La plupart des recherches effectuées sur le rôle des avions à réaction dans les changements de nébulosité observés au cours des dernières décennies en diverses localités ont conclu à une corrélation positive entre l'apparition des traînées de condensation et l'existence de plus en plus fréquente de cirro-stratus. En effet, la vapeur d'eau qui résulte de la combustion des hydrocarbures dans les réacteurs se condense à la sortie des réacteurs et forme des myriades de minuscules cristaux de glace bidimensionnels.

Les résultats de recherches entreprises dans la région de Denver entre 1949 et 1969 ont ainsi mis en évidence un incontestable accroissement de la couverture nuageuse locale qui résulte de l'augmentation du trafic aérien pendant cette période.

Schaeffer (1970) souligne aussi le rôle que peuvent jouer les traînées de condensation des aéronefs modernes dans la nature de la couverture nuageuse de vastes territoires. Par exemple, cet auteur a observé entre Denver et la côte Est des Etats-Unis (New Jersey), dans un couloir aérien très emprunté, un voile de cirrus qui s'étendait sans discontinuité sur plus de 2 000 km ! Il conclut que le facteur le plus perturbateur parmi les modifications climatiques non intentionnelles produites par l'impact de la technologie contemporaine sur l'atmosphère, est peut-être lié à *"la manière discrète par laquelle elle semble changer la couverture nuageuse sur des surfaces de plus en plus étendues de la planète".*

D'autres préoccupations sont apparues au cours des dernières années, à la suite de la mise en service d'avions supersoniques de transport (S.S.T.) (1). L'administration fédérale américaine de l'aviation a en effet prévu que 500 SST volant chacun 2 500 heures par an seraient en service entre 1985 et 1990.

Par suite de la rareté relative de la vapeur d'eau dans la stratosphère, on a pu calculer que ces derniers feraient croître de 0,2 ppm (en masse) la quantité totale de cet élément présente à ces altitudes. En outre, comme la majorité de ces appareils voleraient au niveau des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, l'hygrométrie de la stratosphère pourrait être multipliée dix fois plus que la moyenne globale dans ces régions.

Le tableau XXX étudie les principaux contaminants stratosphériques produits par les réacteurs des SST.

(1) Rappelons cependant qu'il existe déjà un nombre assez élevé d'avions militaires supersoniques ou même subsoniques (B 52) qui volent à l'altitude du SST (entre 16 et 24 km) mais leurs réacteurs sont moins puissants et le nombre d'heures de vol plus faible que dans le cas du SST.

BOSTON UNIVERSITY LIBRARY

Les effets des SST sur l'hygrométrie stratosphérique seront donc assez importants. Celle-ci augmentera de dix fois, dans les conditions de vol prévues. Ils seront aussi significatifs, bien que de moindre importance, en ce qui concerne la turbidité stratosphérique. Celle-ci croîtra de 1/3 par rapport à la valeur qu'elle présentait au niveau de la stratosphère avant l'éruption du Mont Agung, mais seulement de 1/100e par rapport à son niveau actuel.

La pollution de la stratosphère par les SST pourrait présenter trois types de conséquences différentes :

— une interférence avec l'effet de serre puisque la vapeur d'eau absorbe aussi l'infra-rouge en particulier dans la bande située au-delà de 14 μ,

— une modification de la nébulosité stratosphérique par suite des phénomènes de condensation,

— enfin une diminution de la concentration d'ozone dans la stratosphère.

Si la première conséquence peut être tenue pour négligeable, il n'en est pas de même des suivantes. Une action sur la couverture nuageuse ne peut être écartée *a priori.* On sait que certaines formes de nébulosité peuvent dans des circonstances particulières se développer dans la stratosphère et même dans la mésosphère : nuages nacrés, cirrus, au niveau des hautes latitudes australes et boréales. On a par exemple décrit, pendant l'hiver antarctique, la présence d'un immense voile de cirrus, situé dans la basse stratosphère et persistant pendant des semaines ou des mois.

Tableau XXX — Principaux contaminants injectés dans la stratosphère par les avions supersoniques de transport (d'après MIT, *Man's impact on the global environment,* 1970)

	Polluants	Quantité moyenne introduite dans la stratosphère	Maximum prévisible dans l'hémisphère Nord	Concentration en particules mesurée à l'altitude de croisière du SST	
				Avant Agung	Après Agung
gazeux	H_2O	0,2 ppm (0,3)*	2 ppm (3)		
	CO	6,8 ppb (7,3)	68 ppb (73)		
	NO	6,8 ppb (7,3)	68 ppb (73)		
	SO_2	0,16 ppb(0,2)	1,6 ppb (2,0)		
aérosols	SO_4	0,24 ppb	2,4 ppb	1,2 ppb	36 ppb
	Hydrocarbures + suies	0,16 ppb	16 ppb		
	Total particules	0,34 ppb**	3,4ppb	1,2 ppb	36 ppb

* Le nombre entre parenthèses donne la quantité totale des polluants injectés dans la stratosphère par l'ensemble des SST et des appareils militaires.

** Ces chiffres sont inférieurs à la somme des termes des deux lignes précédentes car la rubrique "hydrocarbures" tient compte de composés liquides ne pouvant être assimilés *stricto sensu* à des particules.

FOURASTIÉ CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il n'est donc pas exclu que les SST puissent provoquer l'apparition de telles formations nuageuses à leur altitude de croisière (20 km). Rappelons qu'à une hauteur de 24 km, le point de congélation pour une concentration de vapeur d'eau de 3 ppm est de — 87° C. Celui-ci pourrait être atteint quelques jours par an dans les régions les plus empruntées par les lignes aériennes occidentales ([1]).

Un accroissement du taux de vapeur d'eau stratosphérique a d'ailleurs localement été signalé au-dessus d'une base aéronavale américaine où celui-ci serait passé de 2 à 3 ppm entre 1964 et 1970.

Cet accroissement de l'hygrométrie pourrait aussi éventuellement réduire le taux d'ozone dans l'atmosphère. La photodissociation de l'eau dans la stratosphère produit en effet de l'hydrogène atomique, qui diminue la concentration d'équilibre de l'ozone à ces altitudes.

Toutefois, d'assez récentes recherches (London et Park, 1970) montrent qu'une augmentation à 5 ppm ou même à 20 ppm de l'hygrométrie stratosphérique ne modifierait pas de façon sensible la teneur en ozone dans l'atmosphère, si l'on tient compte de l'altitude de croisière des SST, et du nombre prévu d'appareils en service en 1990 (Fig. 4.6).

Il ne semble donc pas que l'on puisse craindre une augmentation du taux de rayonnement ultra-violet dans le flux solaire au niveau du sol à la suite du vol d'aéronefs de ce type, tout au moins dans les limites prévues pour l'intensité du trafic des SST. La principale nuisance incontestablement créée par l'utilisation commerciale de ces appareils, paraît surtout liée au niveau du bruit trop élevé créé aux voisinages des aéroports. Malgré tous les démentis, cette nuisance sonore sera considérable. Elle est, en outre, à peu près inéluctable dans la mesure où des considérations technologiques montrent que les caractéristiques de vol de ces appareils interdisent le montage de réacteurs à double flux à fort taux de dilution, beaucoup plus silencieux.

(1) Si, en revanche, les SST sont conduits à voler pendant une partie de leur trajet au voisinage de la tropopause, tous produiront des traînées de condensation et l'on peut alors démontrer qu'ils formeront une couverture nuageuse continue (100 % de nébulosité) au-dessus de leur zone de vol (Bryson et Wendland, 1970). On pourrait alors prévoir la "fin du ciel bleu" pour de nombreux territoires européens et américains.

MODIFICATIONS CLIMATIQUES OBSERVEES DEPUIS UN SIECLE

Nous venons d'examiner dans ce qui précède comment la pollution atmosphérique, provoquée par la civilisation contemporaine, pourrait modifier certains facteurs. Il nous faut maintenant étudier l'évolution du climat planétaire depuis le moment où la société industrielle a commencé à présenter un impact quelque peu significatif sur la biosphère, c'est-à-dire à partir du milieu du siècle dernier, et essayer de mettre en rapport ces fluctuations avec celle de certains polluants atmosphériques.

L'examen des statistiques météorologiques de stations convenablement réparties montre que le climat au voisinage de la surface du globe a varié de façon significative en un siècle (Mitchell, 1963 et 1970).

DUKE UNIVERSITY LIBRARY

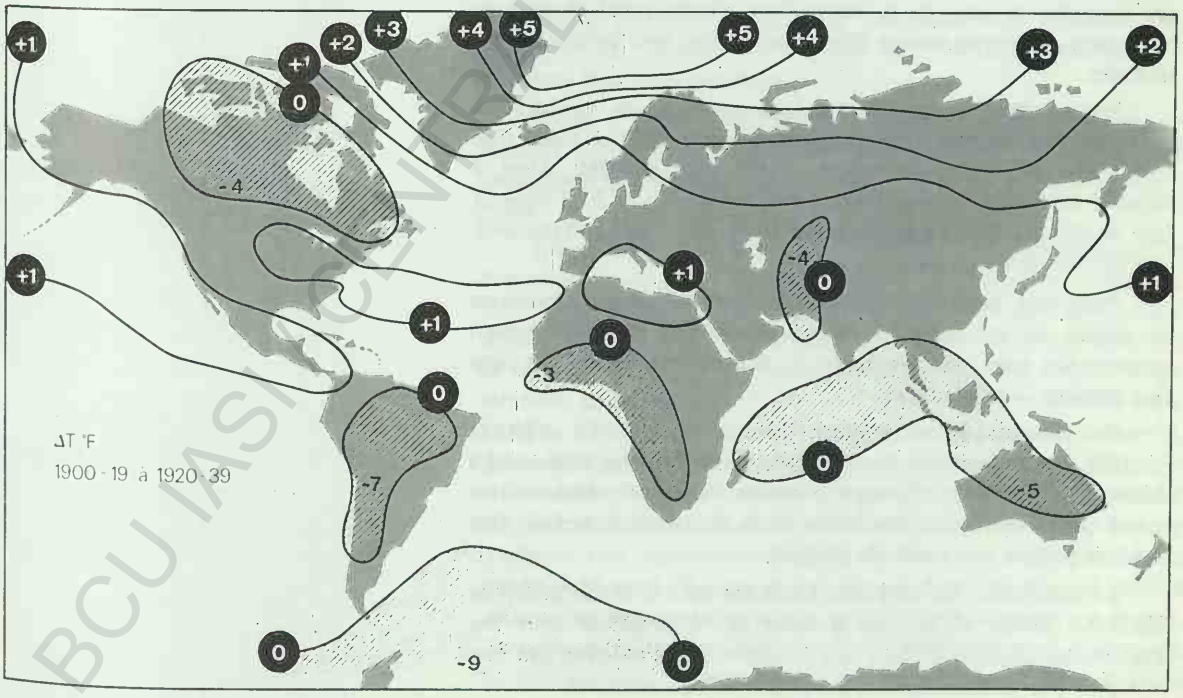
Si l'on prend pour point de départ la température moyenne superficielle en 1880, on constate que celle-ci a tendu à croître lentement jusqu'en 1920, et très vite ensuite. Elle a atteint un maximum en 1941-1943, puis une baisse fort nette s'est produite à partir de cette époque et semble se poursuivre aujourd'hui (Fig. 4.18). L'amplitude maximale de la fluctuation a été de 0,6°C.

Ceci constitue une fraction importante de l'écart présumé de 6° C qui aurait séparé l'optimum thermique interglaciaire de la température moyenne superficielle du globe à l'apogée des grandes glaciations pléistocènes.

Mitchell (1963) a établi une carte des écarts thermiques relevés à la surface de la planète entre les moyennes de 1900-1919 et celles de 1920-1939. Le réchauffement a été maximum dans les régions boréales où il a atteint + 5° F — sauf dans le Grand Nord canadien où les températures ont légèrement baissé au cours de cet intervalle de temps.

Il faut noter aussi un léger refroidissement de diverses zones tropicales au cours de cette phase de hausse moyenne des températures au sol. Ce dernier a été remarqué dans la partie occidentale de l'Afrique, l'Asie du Sud-Est, un partie de l'Australie, le centre du continent Sud-Américain (Fig. 4.19).

Figure 4.19
Carte montrant les variations de la température moyenne annuelle au niveau du sol relevées entre 1900-1920 et 1920-1940. Les chiffres représentent la différence entre la moyenne des températures de la seconde période et celle de la première. On remarque une nette tendance au réchauffement dans l'hémisphère Nord et un léger refroidissement dans les parties occidentales des régions tropicales. D'après Mitchell 1963 in *Hood "Impingment of Man on the ocean", Wiley ed., 1971, p. 318*



BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Partout ailleurs, le réchauffement a été généralisé. Le recul des grands glaciers alpins est par exemple un phénomène notoire, La mer de Glace s'est retirée de plus de 3 km depuis le début du siècle ; elle arrivait alors jusqu'aux abords du village de Chamonix.

Le phénomène est encore plus net dans les hautes montagnes d'Afrique ou d'Amérique tropicale. De nombreux glaciers ont complètement disparu dans les Andes au cours des trois dernières décennies, ce qui explique les catastrophiques inondations survenues, il y a quelques années, à la suite de tremblements de terre ayant rompu les barrages morainiques, mal stabilisés, qui retenaient les eaux des lacs néoformés. Mac Kinder, qui explora le Kenya en 1900, signalait douze glaciers sur les pentes de cette montagne. Il n'en subsistait plus que dix en 1950 et la plupart ont, depuis, continué à régresser de façon rapide. Ce recul des glaciers est encore plus spectaculaire au Kilimandjaro où,de 1930 à 1950, ceux du versant nord-ouest sont remontés de plus de 200 mètres. Sur les cinq glaciers méridionaux que portait cette montagne au début du siècle, deux seulement sont intacts aujourd'hui (Jeannel, 1950).

Diverses données géonémiques confirment ce réchauffement, en particulier en Europe occidentale où plusieurs espèces d'insectes et d'oiseaux d'origine méridionale étendent sans cesse vers le nord leur aire de répartition géographique. Parmi les plus connues, citons la mante religieuse (*Mantis religiosa*), le serin cini (*Serinus canaria*) et la tourterelle turque *(Streptopelia deca-octo*). A l'opposé, les espèces boréales tendent à se retirer vers le nord ainsi qu'en atteste, par exemple, le recul de la morue Ogac (*Gadus ogac*) et aussi du boréogade ou morue polaire (*Boreogadus saida*) vers les plus hautes latitudes.

Plass (1959) a étudié l'accroissement de la température moyenne dans diverses villes européennes entre 1875 et 1952. Il se trouve que celui-ci a été continu entre 1875 et 1952. Ainsi, à Uppsala, en Suède, les températures se sont élevées de 2° F dans ce laps de temps, Cet accroissement dépasse 5° F pour Stykkisholmur en Islande (fig. 4.20).

Plass note que cette augmentation de la température moyenne au niveau du sol dans les zones urbaines est remarquablement synchronisée avec l'accroissement du taux de gaz carbonique dans l'air pendant la même période.

On peut toutefois critiquer cette corrélation. En effet, la quantité de combustibles fossiles consommée dans les villes tend à s'accroître avec celle d'énergie produite. Cela rend aléatoire une stricte corrélation entre l'évolution de la température de l'air dans les villes et celle de l'ensemble du globe.

En conclusion, les variations observées dans le climat global au cours du dernier siècle sont le reflet de l'interférence entre des phénomènes naturels et ceux qui résultent d'une modification non intentionnelle de l'atmosphère par la technologie moderne.

CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

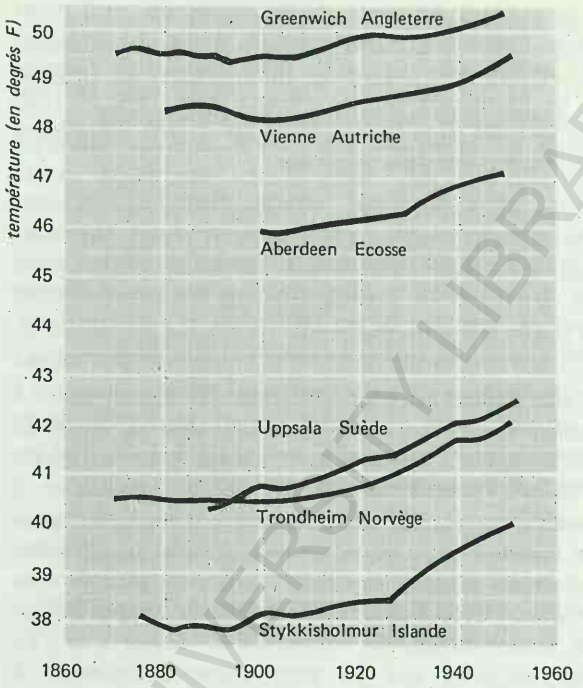


Figure 4.20
Elévation des températures moyennes observées dans diverses villes du monde entre 1875 et 1955. Le réchauffement est d'autant plus sensible que la latitude est plus septentrionale. D'après Plass, Scientific American, juillet 1959

Les fluctuations de la température moyenne de la surface terrestre expriment aussi la résultante de processus antagonistes : hausse de l'effet de serre dû à l'enrichissement de l'air en gaz carbonique d'origine industrielle, refroidissement engendré par l'injection de cendres volcaniques et d'aérosols produits par l'homme dans la stratosphère.

Enfin, il faut toujours garder présente à l'esprit l'existence de facteurs naturels, aujourd'hui encore méconnus, qui régissent les oscillations climatiques constatées au cours de la période historique.

On peut affirmer avec Mitchell (1970) que l'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique, qui a commencé au milieu du XIX^{e} siècle, a exercé une influence significative sur les températures. Toutefois, le rôle de l'élévation du taux de ce gaz dans l'air se confond avec celui des facteurs naturels assez mal connus. Selon Mitchell, seulement 0,2° C (sur la hausse de 0,6° C observée entre 1870 et 1940) correspond à l'augmentation de la concentration du gaz carbonique atmosphérique au cours de cette période. Selon ce même auteur, le refroidissement constaté depuis le milieu des années 40 résulterait de la recrudescence des activités volcaniques. Il existe d'ailleurs une corrélation troublante, mise en évidence par les figures 4.14, et 4.18 entre le sens des variations du taux de cendres volcaniques dans la stratosphère et celui de la température globale. On constate qu'aux périodes où le volcanisme augmente d'intensité, les températures tendent à plafonner ou décroître, même si l'on se

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

trouve dans une phase croissante de la courbe des oscillations moyennes de la température superficielle du globe. Au contraire, elles tendent à croître lorsqu'advient un ralentissement de l'activité volcanique : les maximums ont été atteints entre 1870 et 1880 et 1920-1945, périodes où la concentration des cendres volcaniques dans la haute stratosphère était minimale.

L'évolution future du climat terrestre dépendra donc, non seulement des facteurs naturels partiellement méconnus, mais aussi de l'impact de l'homme sur l'atmosphère. Celui-ci est ambigu car il se traduit par une tendance au réchauffement des basses couches troposphériques par injection de gaz carbonique et à leur refroidissement par introduction de particules dans la stratosphère.

L'action de l'homme sur les températures globales s'exercera à l'avenir dans un sens positif ou négatif, suivant que l'influence du gaz carbonique d'origine industrielle continuera à l'emporter ou qu'au contraire celle des particules deviendra prédominante.

Actuellement, la plupart des spécialistes s'entendent pour conclure à un maintien de la hausse des températures superficielles pendant les décennies à venir, sous l'effet de la croissance du taux de gaz carbonique atmosphérique. Compte tenu de l'augmentation prévue de la consommation des combustibles fossiles d'ici l'an 2000, Mitchell considère que les températures continueront à croître jusqu'à un maximum supérieur de 1° C à la température moyenne superficielle actuelle du globe. Ce maximum serait atteint d'ici la fin du siècle. D'autre part, cet auteur n'attribue pas un rôle significatif aux particules produites par l'homme au cours des dernières décennies. Il a pu calculer que les aérosols introduits dans la stratosphère par la civilisation contemporaine auraient été tout au plus responsables d'une baisse de température de 0,05° C pendant les années 60. Cette baisse aurait été entièrement masquée par les effets du réveil de l'activité volcanique dans la zone circum-pacifique, en particulier par celui du Mont Agung, lequel aurait joué un grand rôle dans la chute de la moyenne superficielle récemment observée.

En revanche, Mitchell, Rasool et Schneider s'entendent pour conférer aux aérosols produits par l'homme un rôle prépondérant dans l'ajustement de la température du globe après l'an 2000. Leur effet non seulement contrebalancerait celui du gaz carbonique mais irait même jusqu'à l'excéder, ce qui provoquerait une chute sensible des températures terrestres. Rasool et Schneider prédisent même le retour d'une nouvelle période glaciaire au cours du XXI^{e} siècle si la civilisation industrielle s'avérait incapable de mettre un terme à la pollution atmosphérique dans un proche avenir.

EFFETS SUR LES MESOCLIMATS

A l'échelle régionale — celle des mésoclimats — les modifications météorologiques liées à la pollution atmosphérique sont connues de longue date et ne prêtent pas à discussion.

BOJIAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les zones urbaines fortement polluées présentent donc une modification sensible de leur mésoclimat, lequel diffère notablement de celui des zones rurales adjacentes (Tableau XXXI).

L'effet principal se manifeste sur l'ensoleillement, avec pour corollaire, une influence sur l'éclairement au sol. Celui-ci se trouve réduit, quelle que soit la saison, par l'opacification des basses couches atmosphériques. De plus, surtout dans les conditions hivernales, il y a formation de brouillard : c'est le phénomène du smog (1), qui constitue une véritable plaie pour bien des villes industrielles depuis plus d'un siècle.

(1) Ce mot, d'origine anglo-saxonne, est composé de *smoke* (fumée) et *fog* (brouillard).

Les brouillards

La lecture du tableau XXXI nous montre que le brouillard constitue de beaucoup le principal facteur de réduction du flux solaire en milieu urbain. L'apparition des smogs est avant tout liée à la présence d'une inversion de température. Ce phénomène météorologique se caractérise par une modification du gradient thermique de la troposphère.

Tableau XXXI — Modifications du mésoclimat urbain par la pollution atmosphérique

Facteurs météorologiques	*Comparaison de la valeur de ces facteurs en milieu urbain et en zone rurale adjacente*
Opacité atmosphérique	
Brouillards (smogs)	
Hiver	100 % de plus
Eté	30 % de plus
Nébulosité	de 5 à 10 % de plus
Particules	de 10 à 20 % de plus
Rayonnement U.V.	10 % de moins
Eté	40 % de moins
Précipitations	5 à 10 % de plus
Température moyenne annuelle	0,5 à 1°C de plus
Température moyenne hivernale	1 à 2°C de plus
Vitesse du vent moyenne annuelle	20 à 30 % plus faible
Tempêtes	10 à 20 % plus faible

* D'après Mac Donald (1971) mais modifié

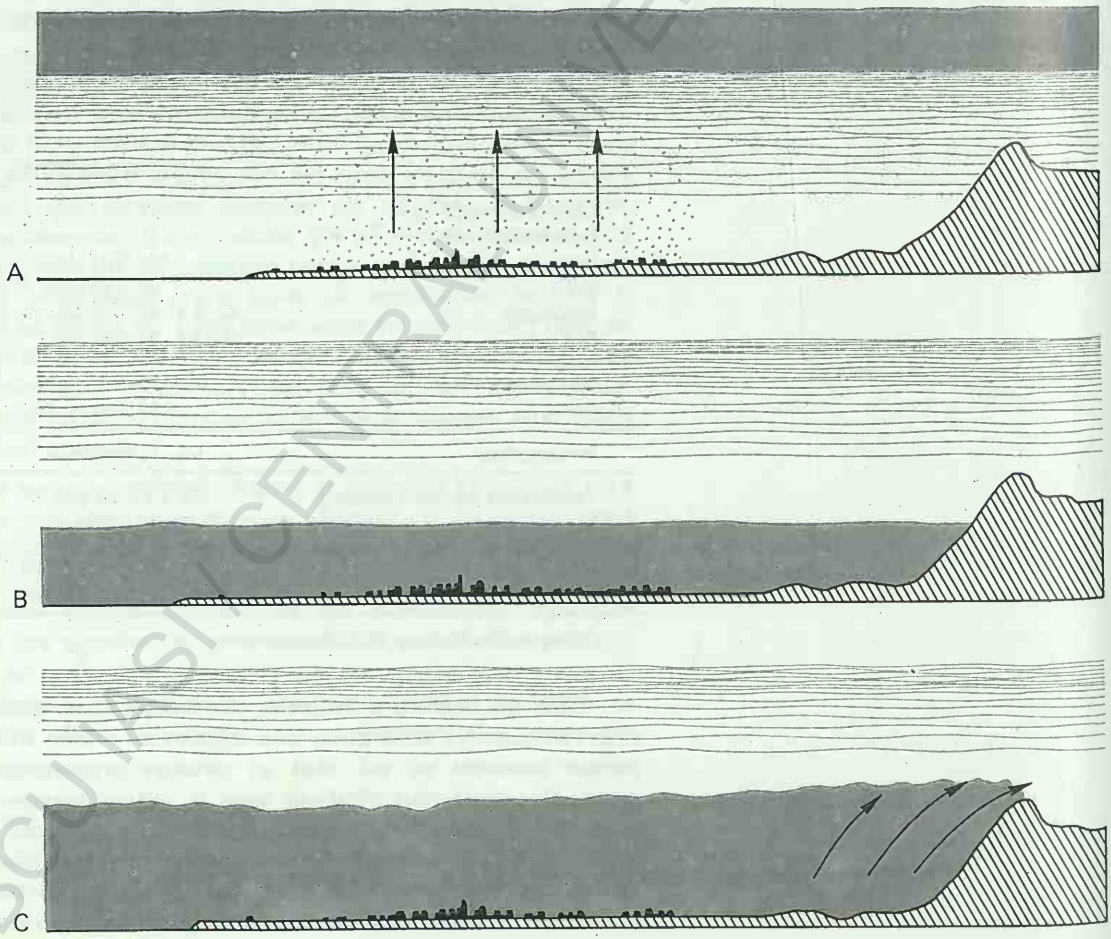
Dans les conditions normales, les températures décroissent avec l'altitude, les couches les plus chaudes sont celles situées au contact immédiat du sol. Mais en certaines circonstances, une nappe d'air froid peut s'insinuer entre la surface terrestre et les masses d'air chaud. Par ailleurs, le refroidissement des basses couches atmosphériques, situées aux voisinages du sol, peut aussi survenir pendant la nuit en hiver. Cela résulte d'une perte de chaleur par rayonnement de la surface terrestre lorsque le temps est

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

clair et l'air calme ([1]). Il apparaît alors, au voisinage immédiat du sol ou à une altitude variable, souvent située vers 200 à 300 mètres, une couche d'inversion dans laquelle les températures croissent lorsqu'on s'élève jusqu'à un niveau appelé *plafond de l'inversion.* A partir de celui-ci, le gradient thermique redevient normal, c'est-à-dire négatif.

Lorsque l'inversion de température se manifeste les fumées et gaz polluants produits par les combustions et autres sources ne peuvent plus s'élever dans l'air et se diluer comme ils le font dans les conditions normales (fig. 4.21). En effet, les gaz chauds sont bloqués dans leur mouvement ascensionnel par la couche d'inversion, dont la densité est égale à la leur, et stagnent au voisinage du sol. Par ailleurs, la température de l'air peut être assez basse pendant l'inversion pour que l'humidité se condense sous forme de brouillard. Ce phénomène est favorisé par les aérosols qui servent de centres de condensation pour la vapeur d'eau.

(1) Le phénomène de la gelée blanche, qui a lieu par temps calme, correspond aussi à un refroidissement nocturne du sol par perte de radiations.



BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les smogs ainsi formés représentent le plus redoutable type de pollution atmosphérique. Ils permettent la concentration maximale de substances toxiques dans l'air puisque leur dilution est rendue impossible par la couche d'inversion. Ainsi, pendant le grand smog de Londres en 1952, on releva une teneur en gaz sulfureux dépassant 1,34 ppm, alors que la teneur "normale" avant l'apparition du brouillard était de 0,1 ppm. De même, la concentration en poussières dépassa aussi de dix fois sa valeur habituelle !

L'inversion de température présente, dans les vallées, des effets encore plus catastrophiques car le relief favorise la stagnation des masses d'air. Tel est le cas de Los Angeles. Située au fond d'une cuvette entourée de collines, cette ville détient un triste record, celui de l'intensité du smog : elle est plongée plus de 200 jours par an dans le brouillard, alors que les conditions climatiques de la région, de caractère méditerranéen, permettraient plus de 250 jours par an sans nébulosité en l'absence de pollution.

Enfin, il convient de remarquer que le smog entretien lui-même l'inversion de température. Le matelas d'air chargé de poussières qui recouvre le sol interdit son réchauffement par les rayons solaires pendant la journée car il absorbe ou réfléchit vers l'espace la quasi-totalité du flux incident. Ainsi, la partie supérieure de cette masse d'air froid se refroidit elle-même par rayonnement et redescend vers le sol puisqu'elle devient plus dense.

Seul, le vent peut mettre un terme à une période de smog, en balayant loin de la zone contaminée la masse d'air polluée. L'intensité moyenne du vent est donc un élément essentiel dans l'ajustement du niveau de pollution d'une zone urbaine. Le vent peut de plus, amener les particules contaminées bien au-delà de la zone d'émission des polluants. La Norvège et la Suède reçoivent de la sorte des aérosols et divers gaz produits en Grande-Bretagne et dans les zones densément industrialisées d'Europe occidentale (Ruhr, Bénélux), que les vents entraînent de l'autre côté de la mer du Nord et de la Baltique.

Outre le vent, d'autres facteurs climatiques interfèrent avec le phénomène du smog, en particulier l'ensoleillement et l'hygrométrie. Dans les régions à climat méditerranéen, à forte insolation, les radiations lumineuses provoquent la formation de smogs oxydants, diverses réactions photochimiques engendrant la synthèse d'ozone et de peroxyacylnitrates. Au contraire, en climat tempéré froid, il apparaît des smogs acides car la forte humidité atmosphérique favorise la transformation du gaz sulfureux en acide sulfurique au niveau des gouttelettes d'eau atmosphérique que renferment ces brouillards.

Le dôme de pollution et ses effets climatiques.

Même en l'absence d'inversion de température, il se constitue toujours par temps calme une coupole (ou dôme) de pollution au-dessus des villes. Celle-ci se reconnaît au loin par la couleur

Figure 4.21
L'inversion de température joue un rôle déterminant dans la formation des smogs. Ici est figurée l'évolution de ce phénomène dans le bassin de Los Angelès où il s'observe pendant plus de cent jours par an. Dans les conditions normales (A), la température de l'air décroît avec l'altitude — l'intensité du grisé sur le schéma est proportionnelle à la faiblesse des températures — aussi, les masses d'air chaud s'élèvent et dispersent les polluants émis au sol. Quand l'inversion s'établit, une langue d'air froid s'enfonce en coin au-dessous d'une masse d'air chaud venant des déserts californiens. Dans ce cas, le gradient de température est inversé et les substances polluantes gazeuses ou particulaires s'accumulent dans la couche d'inversion. Celle-ci persiste jusqu'à ce que changent les conditions météorologiques. L'apparition de vent par exemple (C) provoque le départ de l'air froid et du smog. D'après Mac Dermott in *Scientific American, octobre 1961*

jaune-brunâtre que lui confère le peroxyde d'azote qu'elle renferme.

La coupole de pollution est une conséquence de la formation de l'îlot de chaleur urbain. On constate en effet que la température des villes est toujours supérieure à celle des zones rurales adjacentes (Tableau XXXI), et qu'elle décroît des quartiers centraux vers la périphérie. La constitution de cet îlot de chaleur dépend de plusieurs facteurs : existence de sources thermiques d'origine artificielle (chauffage, machines, véhicules à moteur) et caractères radiatifs propres aux constructions urbaines. En effet, la ville est faite de grands immeubles verticaux dont les murs réfléchissent la lumière solaire vers le sol, alors qu'à la campagne, la surface horizontale de la terre la réfléchit vers l'espace. De plus, les édifices sont construits en matériaux (pierres, béton) qui absorbent fortement les radiations et accumulent la chaleur.

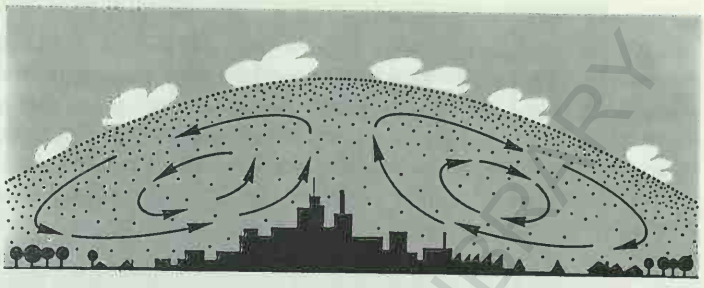
L'ensemble de ces caractères propres aux villes font qu'elles sont surmontées par temps calme d'une masse d'air chaud (et pollué) qui tend à s'élever au-dessus de l'agglomération et dans laquelle il apparaît tout un système de courants de convection (Fig. 4.22).

Cette masse d'air contaminée par des gaz et des poussières forme un dôme de hauteur croissante, qui ne disparaîtra que si le vent se lève ou s'il advient une précipitation. Il semble d'ailleurs que les courants ascendants animant le dôme de pollution soient la cause de la quantité de précipitations, supérieure à celle de la campagne avoisinante, observée en milieu urbain (Fig. 4.23). Les courants ascendants créés par l'îlôt de chaleur amènent en effet le dôme de pollution à des hauteurs croissantes. A partir d'une certaine altitude, le refroidissement de cette masse d'air pollué atteint une intensité suffisante pour provoquer la formation de pluie ou de neige par condensation de l'hygrométrie contenue dans le dôme. La présence dans celui-ci de diverses poussières, en particulier de particules riches en plomb émises par les moteurs à essence, qui constituent d'après Schaeffer (1970) d'efficaces noyaux de condensation pour la vapeur d'eau atmosphérique, explique la plus grande fréquence des précipitations en milieu urbain.

Le déficit d'insolation, considérable dans les villes, résulte de la conjugaison des effets du brouillard et de la turbidité de l'air. A Londres, par exemple, on estime que la ville subit entre septembre et avril une perte moyenne de 50 minutes d'ensoleillement par jour par rapport à la campagne environnante, ce qui est considérable si l'on tient compte de la brièveté du jour pendant la mauvaise saison à cette latitude (Lowry, 1967). D'autres données montrent que le déficit d'insolation hivernale atteindrait près de 50 % dans les régions urbaines les plus industrialisées d'Europe occidentale. A Paris, (fig. 4.24) on relève une visibilité inférieure à 1 500 mètres pendant 35 % de la durée totale du jour au cours de la mauvaise saison alors que celle-ci n'est que de 6 % dans les zones rurales circum-urbaines.

PROVOST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Figure 4.22
Le dôme de pollution des grandes villes résulte de l'apparition de courants ascendants et de convection qui entraînent à grande altitude les poussières et les gaz émis au niveau du sol. Sa présence joue un rôle fondamental dans la nature du mésoclimat urbain. Explications complémentaires dans le texte. D'après Lowry in *Scientific American, août 1967, p. 20*



A

B

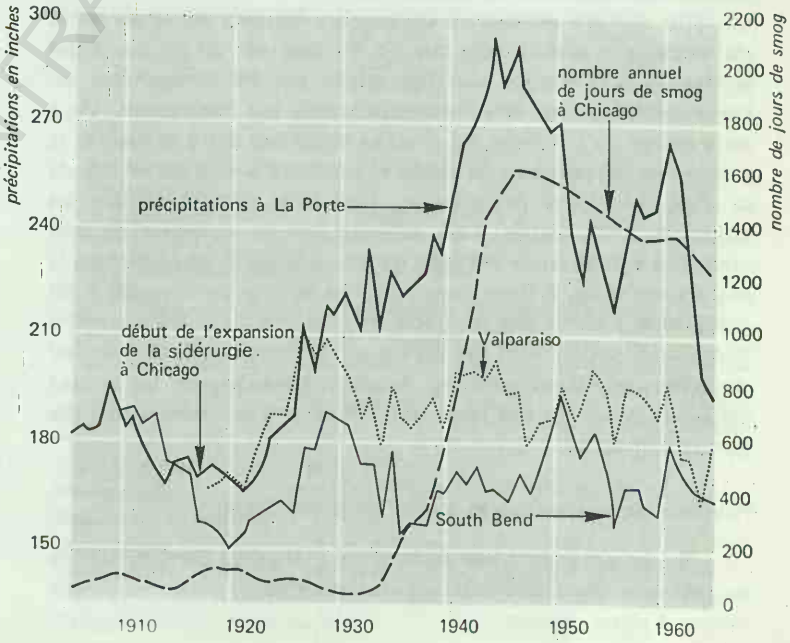


Figure 4.23
A – Pollution atmosphérique d'origine industrielle dans les environs de Chicago (cliché F. Ramade).
B – Evolution climatique dans la région de Chicago et dans la campagne avoisinante. Alors que la nébulosité due aux aérosols dans cette ville très riche en unités sidérurgiques provoque un accroissement des précipitations dans sa banlieu (La Porte) pendant la période considérée, la pluviométrie n'a pas montré de variations significatives pendant la même période dans les faubourgs de Chicago, qui ne sont pas situés sous le vent de la zone où se concentre l'industrie lourde (Valparaiso et South Bend). D'après Changnon in *Shaw et Munn "Introduction to the scientific study of atmosphere pollution", Reidel ed., 1971, p. 82*

DAVIS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

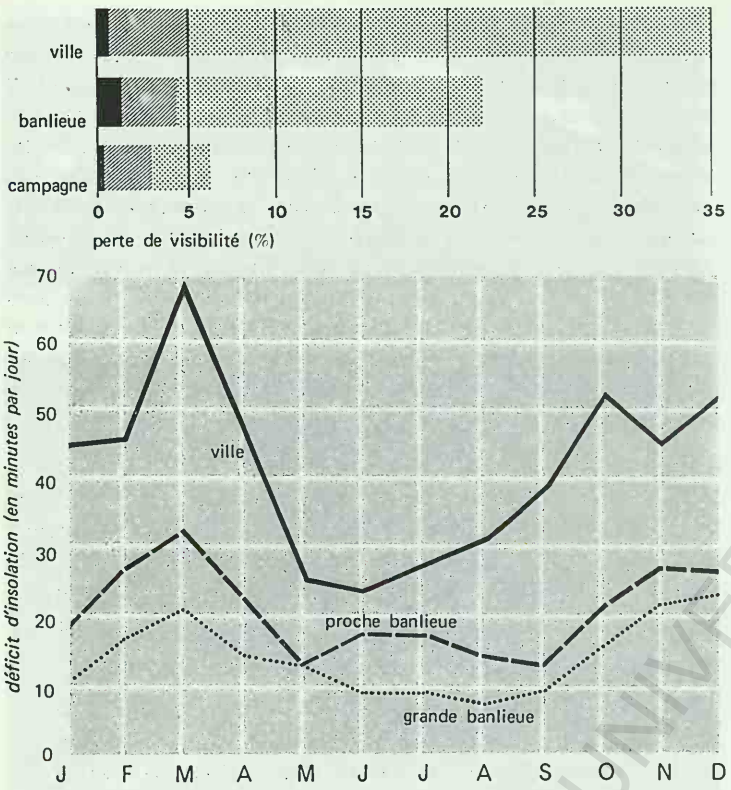


Figure 4.24
Déficit d'insolation dans les villes.
A — Perte de visibilité consécutive au brouillard dans la région parisienne pendant la mauvaise saison. En clair est figuré le pourcentage de la période diurne pendant laquelle la visibilité est réduite entre 400 et 1 600 m, en grisé celui où elle est comprise entre 400 et 100 m, enfin en noir celui où elle est inférieure à 100 m.
B — Perte d'insolation dans la région londonienne entre 1921 et 1950. D'après Lowry in *Scientific American, août 1967*

Même en l'absence de smog, l'existence du dôme de pollution par temps calme se traduit par une forte absorption des radiations. Celle-ci atténue beaucoup la visibilité dans les villes. Ainsi, à Paris, où cette dernière dépassait 6 km pendant 95 jours par an au début du siècle, elle n'était plus que de 40 jours par an au cours des années 30. L'absorption du flux solaire par les atmosphères urbaines polluées peut être importante même par beau temps. On a pu montrer qu'à Vienne, les couches comprises entre la base et le sommet de la cathédrale St-Stephan retiennent à elles seules 6 % de ce flux. Le dôme de pollution filtre plus particulièrement les radiations ultraviolettes. Leur intensité est en moyenne de 5 % inférieure à leur valeur normale en été et de 30 % en hiver dans la plupart des villes. A Paris, dans les zones les plus polluées, 90 % du rayonnement ultraviolet peut être absorbé. Par suite des propriétés bactéricides particulières aux rayons ultraviolets, la pollution de l'air des villes peut donc présenter de graves conséquences sur le plan épidémiologique car elle favorise indirectement la dissémination des germes pathogènes.

Pollution atmosphérique et cycles biogéochimiques

Nul ne songerait à nier aujourd'hui l'influence perturbatrice de la pollution atmosphérique sur les principaux cycles biogéochimiques à phase gazeuse.

Le tableau XXXII permet de comparer les diverses quantités des polluants majeurs rejetées dans l'air par différentes sources technologiques, avec celles engendrées par les processus naturels. Il apparaît que dans le cas des dérivés gazeux du carbone, dans celui du soufre et, dans une moindre mesure, celui des dérivés de l'azote, notre civilisation est en train de modifier de façon significative le taux de circulation de ces éléments dans la biosphère. En effet, l'ordre de grandeur du volume d'anhydride sulfureux, d'hydrogène sulfuré et de sulfate (aérosols) produits par l'homme est comparable à celui que libèrent les phénomènes biogéochimiques dans l'atmosphère ($6{,}8 \times 10^{10}$ kg contre $1{,}3 \times 10^{11}$ kg !). Il en est de même pour le carbone par suite de la consommation frénétique des stocks de combustibles fossiles.

PERTURBATION DU CYCLE DU CARBONE

Les masses très considérables de gaz carbonique injectées dans l'atmosphère par la combustion des diverses formes de carbone fossile, perturbent de façon croissante le cycle biogéochimique de cet élément. La comparaison de leur importance avec celle des principaux facteurs naturels de circulation du carbone dans la biosphère (Tableau XXXIII) est fort significative à cet égard.

Tableau XXXII — Comparaison des quantités de substances gazeuses produites par l'homme avec celles injectées dans l'atmosphère par les phénomènes biogéochimiques *

Composés	*Quantités produites en 10^6 t/an*	
	d'origine naturelle	*d'origine industrielle*
O_2	$1{,}8 \times 10^3$	faible
CO_2	$7{,}2 \times 10^4$	$1{,}4 \times 10^4$
CO	? (> 70)	$1{,}8 \times 10^2$
H_2O	$4{,}5 \times 10^8$	9×10^3
Dérivés du S (en équivalent S)	130	68
Dérivés de l'azote (en équivalent N)	1400	18

* D'après Varney et Mac Cormac, modifiée.

Tableau XXXIII — Circulation du gaz carbonique dans la biosphère (*)

	Quantité	*Rapport* $\frac{\text{contenu atmosphérique}}{\text{taux de renouvellement}}$
Contenu atmosphérique	$2{,}8 \times 10^{12}$ t	
Photosynthèse	$1{,}1 \times 10^{11}$ t/an	~ 26 ans
Respiration + fermentation	$7{,}2 \times 10^{10}$ t/an	
Combustions	$1{,}5 \times 10^{10}$ t/an	185 ans
Fossilisation	10^7 t/an ?	$2{,}8 \times 10^5$ ans ?

* D'après Johnson (1970), modifié.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La lecture de ce tableau montre que l'ordre de grandeur des quantités de gaz carbonique industrielles est comparable à celui mis en œuvre par l'ensemble des organismes autotrophes de la biosphère ou à celui des masses de gaz carbonique rejetées dans l'atmosphère par la respiration et les phénomènes de fermentation de tous les êtres vivants !

Il apparaît aujourd'hui que les facteurs homéostasiques qui maintenaient constant le taux de gaz carbonique atmosphérique n'arrivent plus à contrôler les quantités de ce gaz que l'homme déverse dans l'air. Il en résulte un accroissement continu de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère dont nous avons déjà étudié l'importance dans ce qui précède (Fig. 4.25).

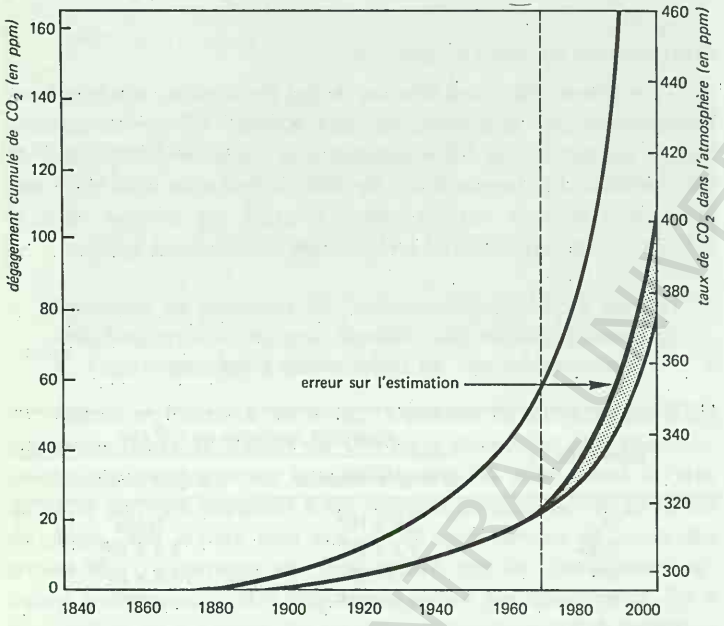


Figure 4.25
Croissance du taux de CO_2 atmosphérique depuis 1860 jusqu'à nos jours et prospectives jusqu'à l'an 2000. La courbe supérieure représente le taux cumulé de CO_2. L'écart entre celle-ci et le graphe inférieur correspond à la quantité fixée par la biomasse ou absorbée par l'hydrosphère (dissolution), l'intervalle entre les deux courbes inférieures (en grisé), à l'erreur sur l'estimation de la croissance future de ce taux. D'après Bolin in *Scientific American "the biosphere", sept. 1970, p. 132.*

La figure 4.26 montre l'évolution de la concentration du gaz carbonique dans l'air, relevée à l'observatoire de Mauna Loa aux Iles Hawaï. Les fluctuations annuelles observées résultent des variations saisonnières de l'intensité de la photosynthèse. Malgré ces oscillations, on constate que la valeur moyenne croît de façon continue. Elle est passée de 312 à 320 ppm entre 1958 et 1970.

Si l'on tient compte de la quantité de gaz carbonique rejetée par l'homme dans l'atmosphère en 1967, on peut calculer que l'élévation de sa concentration dans l'air devrait être de 2,3 ppm par an. Elle n'a été que de 0,7 ppm/an à Mauna Loa pendant la période considérée. On doit donc conclure à l'existence de facteurs naturels qui interviennent et réduisent d'environ 75 % la masse totale de gaz carbonique introduite par les combustions dans l'atmosphère. L'extraction de ce gaz en excès dans l'air peut résulter de divers processus.

SOUTH CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

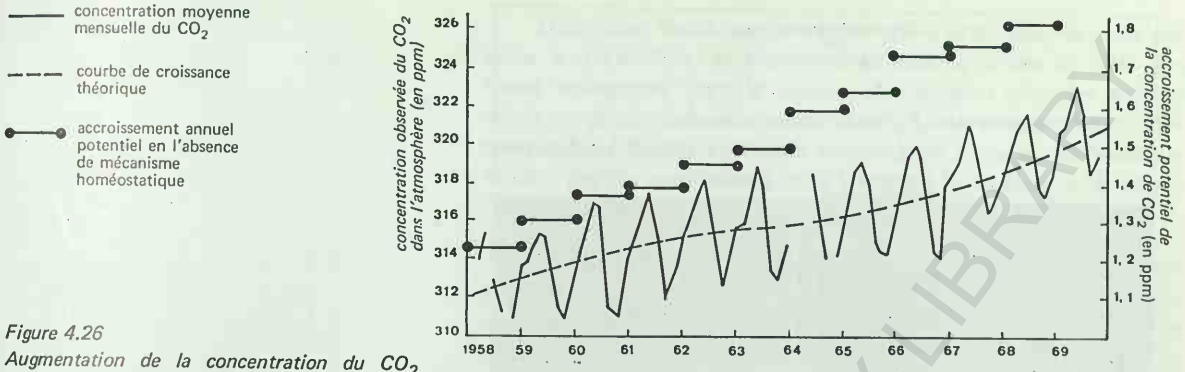


Figure 4.26
Augmentation de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère provoquée par la combustion des divers dérivés du carbone fossile (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.). D'après divers auteurs in *M I T "Man's impact on the global environment", 1970, p. 48*

Rappelons que le cycle du carbone est conditionné par un ensemble de facteurs antagonistes — respiration, fermentation, volcanisme, dégageant du gaz carbonique dans l'atmosphère —, photosynthèse, dissolution et sédimentation dans les océans tendant à l'en extraire.

Où va le carbone produit par les combustions et qui ne séjourne pas dans l'atmosphère ?

Le rôle de l'océan, qui dissout une grande partie du gaz carbonique, apparaît essentiel dans cette résorption du gaz carbonique d'origine industrielle. Mais la biomasse intervient aussi comme facteur d'équilibre et tend à faire décroître l'excès de concentration du gaz carbonique atmosphérique puisque la photosynthèse augmente quand le taux de ce gaz dans l'air s'élève.

Bolin (1970) a essayé d'évaluer quantitativement les diverses phases du cycle du carbone compte tenu de l'intrusion dans celui-ci du gaz carbonique d'origine industrielle (Fig. 4.27).

Il faut en premier lieu remarquer que la majeure partie du carbone est fixée dans les roches sédimentaires de la lithosphère (20×10^{15} t), sous forme, entre autres, de charbon et d'hydrocarbures fossiles (environ 10^{13} t). Par ailleurs, $34{,}5 \times 10^{12}$ t seraient fixées sous forme de gaz carbonique dissous dans les eaux profondes océaniques et 5×10^{11} t dans les couches superficielles de l'hydrosphère. On constate aussi que la masse totale de matières organiques contenues dans l'hydrosphère est très considérable (3×10^{12} t de carbone). Les données de Bolin mettent aussi en évidence la prédominance de la biomasse terrestre sur celle des océans ($4{,}5 \times 10^{11}$ t de carbone contre 10×10^{9} t).

Si l'on peut considérer qu'il existe dans les biomes terrestres un rigoureux équilibre entre les quantités de gaz carbonique absorbées et rejetées par les divers organismes constituant l'ensemble des biocœnoses [1], il n'en est plus de même en milieu marin où le problème est beaucoup plus complexe à cause des phénomènes de dissolution et de sédimentation.

(1) Cette compensation entre le volume de CO_2 absorbé par les autotrophes et celui rejeté par la respiration des êtres vivants n'est en réalité valable que dans la mesure où ne varie pas la concentration du CO_2 atmosphérique (cf. p. 223).

BIBLIASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

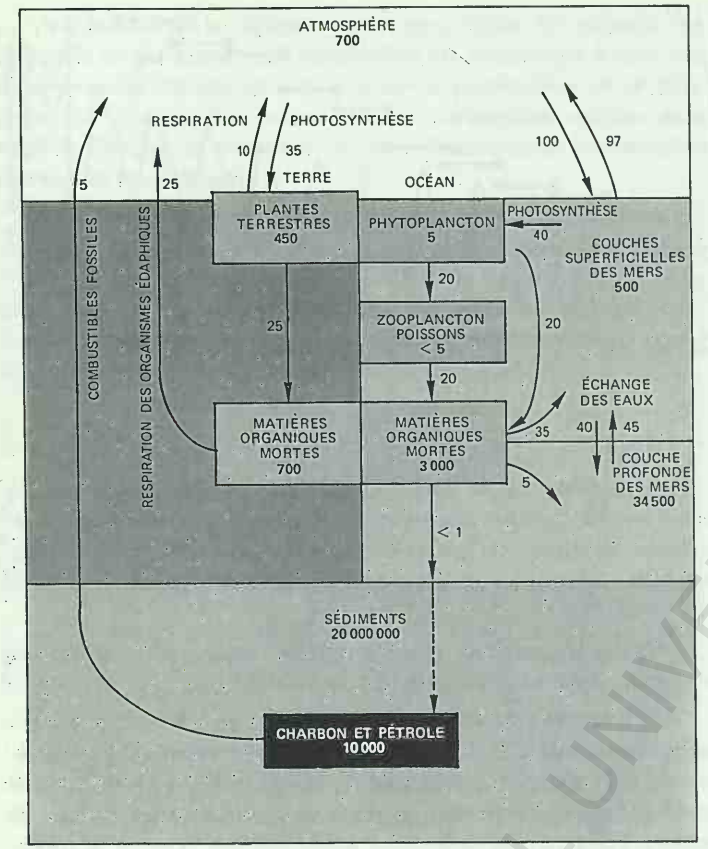


Figure 4.27
Perturbation du cycle biogéochimique du carbone par suite de l'usage des combustibles fossiles comme principale source d'énergie dans la civilisation contemporaine. Explications dans le texte. D'après Bolin, in *Scientific American "the biosphère" sept. 1970, p. 130*

Le cycle du carbone s'effectue dans l'océan de façon assez autonome, par rapport à l'atmosphère et aux écosystèmes terrestres. En effet, l'hydrosphère renferme à l'état dissous la plus grande partie du gaz carbonique présent dans la biosphère (4×10^{12} t contre 7×10^{11} t dans l'atmosphère, soit 60 fois plus selon Bolin). Le phytoplancton assimile le gaz carbonique dissous dans les eaux et libère de l'oxygène qui passe en solution. A l'opposé, le zooplancton et le necton (poissons, mollusques, cétacés, etc.) consomment le carbone fixé sous forme organique par les autotrophes et utilisent l'oxygène dissous pour leur respiration. Par ailleurs, la fermentation des matières organiques mortes contenues dans les eaux profondes remplace une partie du gaz carbonique absorbé par le phytoplancton soit, $3{,}5 \times 10^{10}$ t de carbone sur 4×10^{10} t qui seraient annuellement assimilées par celui-ci (Bolin, 1970).

UQAM CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Enfin, une faible partie de la matière organique, estimée par Bolin à $2,5 \times 10^6$ t, se sédimenterait chaque année au fond des fosses océaniques. Dans la mesure où l'on peut accorder quelque crédit à cette évaluation, on voit que la consommation des combustibles fossiles s'effectue de nos jours à une vitesse plusieurs milliers de fois supérieure à celle à laquelle le carbone se fossilise à l'heure actuelle.

Le gaz carbonique océanique n'est cependant pas indépendant de celui contenu dans l'air. Il existe en effet des échanges entre les couches superficielles de l'océan et de l'atmosphère. L'étude de la vitesse à laquelle s'effectue le remplacement du $^{14}CO_2$ introduit dans l'air par les expérimentations nucléaires de 1956 a permis d'évaluer à 10^{11} t la quantité de gaz carbonique qui se dissout chaque année dans l'hydrosphère. A l'opposé $9,7 \times 10^{10}$ t de carbone passent en sens inverse chaque année de l'océan vers l'atmosphère. Ces phénomènes d'échange de gaz carbonique entre le milieu aquatique et l'air seraient sous le contrôle d'un système enzymatique du type anhydrase carbonique présent dans l'eau de mer (Berger et Libby, 1970).

En 1967, $5,08 \times 10^9$ t de carbone ont été injectées dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique d'origine industrielle. Environ 60 % de cette quantité de carbone fossile, soit 3×10^9 t, auraient été dissous dans l'océan selon Bolin. On sait que $1,5 \times 10^9$ t sont restées dans l'atmosphère et rendent compte de l'accroissement de 0,7 ppm observé pour la teneur en gaz carbonique dans l'air. Les 10 % restants auraient été, d'après Bolin, incorporés à la biomasse. En effet, la quantité totale de matière organique stockée dans les biocœnoses peut s'accroître si la concentration du gaz carbonique dans l'air s'élève. On sait qu'en l'absence de facteurs limitants, une augmentation de 10 % du taux de gaz carbonique atmosphérique se traduit par une hausse de 5 à 8 % de l'intensité de la photosynthèse, c'est-à-dire de la production primaire. De telles considérations ont conduit Bolin (1970) à évaluer à 15×10^9 t l'accroissement de la biomasse végétale mondiale au cours du dernier siècle. L'homme fertiliserait de la sorte sans le savoir champs et forêts, par la combustion du charbon et du pétrole !

Malgré les nombreuses incertitudes qui demeurent au point de vue quantitatif sur le cycle du carbone, il apparaît que le pool du carbone fixé sous forme organique dans l'ensemble de la biosphère représente un réservoir potentiel supérieur au volume du réservoir atmosphérique (Tableau XXXIV).

Le pool du carbone organique, dont le temps moyen de résidence pourrait être au moins égal à 60 ans ([1]), et qui comporte non seulement la biomasse mais la matière organique morte (bois et autres productions végétales, litière, humus, etc.), pourrait absorber une partie significative du gaz carbonique atmosphérique.

(1) Le temps moyen de résidence du carbone dans la litière et l'humus est estimé à 700 ans par certains auteurs.

BIU IASI/CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XXXIV – Quantités et taux de production du carbone organique dans la biosphère (en 10^9 t) (*)

Réservoirs	*Quantités de carbone organique contenues*	*Production primaire annuelle*
Biomes terrestres		
Forêts	1012	36
Steppes et toundras	314	9
Déserts	59	3
Zones humides	32	2
Agroécosystèmes	165	6
Total terrestre	1582	56
Océan	703	22
Accroissement de biomasse résultant de l'usage des combustibles fossiles		4
Pool du CO_2 atmosphérique	683	

*D'après MIT. *Man's impact on the global environment*, 1970. Ce bilan exprime en 10^9 tonnes d'équivalent carbone la quantité totale de cet élément contenue dans la biomasse et la matière organique morte (sauf les dépôts fossiles).

La lecture du tableau précédent montre l'existence d'écarts parfois importants entre les données quantitatives relatives à tel ou tel paramètre selon la source consultée. Ainsi, le groupe d'experts du MIT fixe à 703×10^9 t la masse de carbone contenue dans la matière organique morte en milieu océanique, valeur nettement inférieure à celle adoptée par Bolin ([1]).

Il apparaît ainsi, selon le tableau XXXIV, que le volume du réservoir de carbone constitué par la biomasse serait deux fois supérieur au volume du réservoir atmosphérique. Broecker et coll. (1971) lui confèrent une valeur deux fois et demi supérieure à celui contenu dans le gaz carbonique .

Le réservoir constitué par l'ensemble du carbone organique contenu dans la biosphère serait donc assez peu important. En outre, la faiblesse de la productivité nette dans les écosystèmes climaciques provoquera un retour assez rapide du carbone d'origine industrielle dans le pool atmosphérique. Celui-ci sera en effet rejeté après un bref séjour dans la biomasse sous forme de gaz carbonique par la respiration des décomposeurs. Toutefois, ces diverses considérations sont entachées de graves incertitudes, car les valeurs réelles de la biomasse et de la matière organique morte contenue dans la biosphère sont aujourd'hui encore mal connues et sans doute sous-estimées. On en vient donc à se poser deux questions fondamentales qui conditionnent l'évaluation de l'impact réel de la société industrielle sur le cycle du carbone au cours des prochaines décennies :

1) Quelle est l'importance relative du volume des réservoirs dont l'action est homéostatique sur le taux du gaz carbonique

(1) Les estimations relatives à la biomasse et, de façon plus générale, toutes celles qui se rapportent aux diverses phases des cycles biogéochimiques ne représentent actuellement qu'une valeur indicative sur le plan quantitatif. Il est d'ailleurs facile de constater les écarts importants qui subsistent entre les chiffres publiés par divers auteurs. Il est déjà remarquable que les limites extrêmes soient comprises à l'intérieur d'un ordre de grandeur. Il faut en effet se rendre compte de l'extraordinaire complexité que représente l'étude de tels problèmes. Cependant, la mise au point de nouvelles méthodes d'estimation fondées par exemple sur l'usage des isotopes naturels ou artificiels autorise de grands espoirs en ce domaine.

PONTIFICAL UNIVERSITY LIBRARY

atmosphérique, c'est-à-dire de l'océan et de la biomasse ? De façon plus précise, quels sont les volumes réels comparés constitués par les systèmes : carbonate $\Longrightarrow$ bicarbonate $\Longrightarrow$ CO_2 dissous océanique ainsi que par l'ensemble biomasse + matière organique morte ?

2) Quel est le volume du réservoir océanique réellement disponible à moyen terme pour le gaz carbonique d'origine industrielle, compte tenu de la vitesse à laquelle ce gaz est injecté dans l'atmosphère par la technologie moderne ?

Il ne faut pas oublier en effet qu'il existe une limite pour la vitesse à laquelle le gaz carbonique introduit dans l'air par l'action de l'homme est absorbé par le réservoir océanique. Des considérations thermodynamiques ont permis de calculer que les premiers 60 m de l'hydrosphère ne retiennent que le 1/10^{e} de l'accroissement du gaz carbonique dégagé dans l'atmosphère. La diffusion ultérieure de ce gaz dans les couches profondes de 200 à 400 m nécessiterait plusieurs années. Cette lenteur de dissolution du gaz carbonique dans l'océan, conjuguée au fait que la biomasse ne peut absorber qu'une fraction de la quantité supplémentaire de ce gaz injectée par l'homme dans l'atmosphère explique l'accroissement constaté de sa concentration dans l'air.

Il apparaît donc que le réservoir réellement accessible au gaz carbonique d'origine industrielle est de volume nettement plus faible que celui du réservoir potentiel. Cela résulte de la capacité limitée qu'a l'océan d'absorber dans une brève période des quantités supplémentaires de ce gaz.

Il a été possible de faire, grâce à l'effet Suess, une évaluation du volume total du réservoir de gaz carbonique accessible à moyen terme. On désigne sous le terme d'effet Suess le taux de dilution du ^{14}C naturel qui résulte de la libération dans l'atmosphère de quantités importantes de ^{12}C et ^{13}C par suite de la combustion des diverses variétés de carbone fossile. Celles-ci sont très pauvres en ^{14}C à cause de leur ancienneté, puisque la période de ce radio-élément est de 5 800 ans.

On estime à 10 % de la masse totale de gaz carbonique présente dans l'atmosphère les quantités introduites dans celle-ci au cours de la période 1850-1950. On a pu calculer que la décroissance du taux de $^{14}CO_2$ a été de 1 % pendant ce même laps de temps. Un effet Suess de 1 % signifie que le réservoir total accessible pour le gaz carbonique d'origine industrielle (somme des réservoirs océaniques, atmosphériques et biologiques) est d'un volume dix fois supérieur à celui de l'atmosphère (10/1). Il a aussi été possible de déterminer le volume comparatif de la biosphère et de l'océan. Ces derniers constitueraient respectivement des réservoirs deux et huit fois supérieurs au volume du réservoir atmosphérique de gaz carbonique. Cependant, cette évaluation est assez empirique et il ne faudrait pas lui attribuer une valeur trop rigoureuse.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

On peut donc prévoir que si le réservoir océanique est réellement prépondérant par rapport au réservoir biosphérique, il prélèvera avec régularité les fractions de gaz carbonique complémentaires introduites dans l'air et les stockera *ad infinitum.* En effet, le mélange lent mais continu des couches d'eaux superficielles et profondes, qui s'effectue en plusieurs décennies, permet l'absorption de quantités considérables de gaz carbonique en excès.

Mais si au contraire l'importance du réservoir biosphérique (biomasse + matière organique morte) a été sous-estimée, on peut s'attendre à des conséquences fâcheuses à long terme. En effet, une partie du gaz carbonique supplémentaire absorbé par la biomasse retournera à l'atmosphère en quelques décennies quand le carbone organique incorporé dans les tissus des végétaux ligneux et dans l'humus sera attaqué par les consommateurs et surtout les décomposeurs des écosystèmes climaciques.

En ce sens, le comportement de la civilisation contemporaine à l'égard des forêts vierges amazoniennes, congolaises et euryboréales, qui tend vers l'inexorable destruction de ces immenses surfaces boisées, est fort préoccupant. Il pourrait s'avérer catastrophique à long terme par la réduction de la capacité de stockage qui résulterait de la substitution à ces biomes climaciques d'écosystèmes dégradés. L'amenuisement et la saturation des réservoirs disponibles pour le gaz carbonique atmosphérique pourraient se traduire par une hausse accélérée de sa concentration dans l'air à la suite du blocage des mécanismes homéostatiques qui, jusqu'à présent, contiennent avec efficacité la croissance du taux de ce gaz dans l'air. Les conséquences écologiques globales de cet éventuel emballement du cycle du carbone sont quasiment imprévisibles dans les données scientifiques actuelles. Sur le plan climatique, on peut cependant affirmer que la hausse de 2° C de la température moyenne superficielle du globe qui résulterait d'une croissance excessive du taux de gaz atmosphérique ([1]), aurait à elle seule des conséquences catastrophiques pour bien des zones littorales, par suite de la fusion partielle des banquises polaires et de l'élévation consécutive du niveau des océans.

(1) La multiplication par huit du taux de gaz carbonique atmosphérique, laquelle ne saurait être exclue dans l'hypothèse d'une saturation des mécanismes homéostatiques qui le contrôlent, se traduirait par une hausse de 2 K (fig. 4,17) de la température moyenne superficielle du globe (Rasool et Schneider, 1971).

PERTURBATION DU CYCLE DE L'OXYGENE

Malgré diverses spéculations alarmistes, le cycle de l'oxygène n'est pas près d'être perturbé par l'homme, tout au moins de façon directe. Il existe en réalité, à l'époque actuelle, un équilibre rigoureux entre les quantités d'oxygène produites par la photosynthèse et celles absorbées par la respiration. Si l'on prend comme mesure de la quantité de matière organique non consommée par les hétérotrophes la vitesse à laquelle le carbone se sédimente de nos jours dans les océans, on peut en déduire que sur 10 000 parties d'oxygène annuellement produites, toutes sauf quatre d'entre elles sont consommées par la respiration des êtres vivants. La production nette d'oxygène correspondrait à une partie pour 15 millions par rapport à la quantité totale de ce gaz contenue dans l'atmosphère

RYUKOKU UNIVERSITY LIBRARY

(Broecker, 1970). En réalité, une partie de cet excès d'oxygène est consommée par l'oxydation de l'oxyde de carbone, du fer et du soufre dans divers processus géochimiques (Fig. I.23).

Des craintes ont été récemment exprimées au sujet d'une éventuelle déplétion de l'oxygène atmosphérique provoquée par la combustion accélérée des réserves de carbone fossile. Broecker (1970), — compte tenu d'une production de gaz carbonique par l'homme estimée entre 1850 et 1970 à 18 % de la teneur totale de l'atmosphère en ce gaz —, a calculé que celle-ci a nécessité la consommation des 7/10000e du contenu total en oxygène de l'atmosphère. Ce même auteur évalue à 3 % la diminution de la concentration de l'oxygène atmosphérique qui résulterait de la combustion totale de l'ensemble des divers gisements de carbone fossile présents dans la lithosphère. De même, l'usage de la totalité des réserves de gaz naturel, charbon et pétrole techniquement récupérables ferait passer de 20,95 à 20,80 % la concentration moyenne de l'oxygène dans l'air.

Machta et Hugues (1970) ont mesuré avec précision la teneur atmosphérique en oxygène dans des lieux reculés. Ils ont trouvé 20,946 % en volume avec aucune variation géographique décelable. La comparaison avec les analyses les plus précises effectuées en 1910 ne révèle aucun changement décelable dans les limites de la précision des mesures effectuées.

Il serait toutefois pertinent de se demander si le rejet de la plupart des déchets produits par la civilisation moderne dans l'hydrosphère ne pourrait à long terme diminuer le taux d'oxygène dissous dans les eaux marines. Celles-ci renferment en moyenne 250 moles d'oxygène par m^2 de surface océanique. Broecker a montré que si l'homme rejetait dans l'hydrosphère la totalité de la biomasse annuellement produite par la photosynthèse dans l'ensemble des écosystèmes du globe, il faudrait 50 ans pour consommer tout l'oxygène contenu dans les eaux marines. De même, cet auteur a calculé que dans le cas d'une population de 10^9 êtres humains rejetant chaque année 100 kg de détritus (exprimés en matière organique sèche) dans l'océan, il faudrait 25 000 ans pour épuiser ses réserves en oxygène. Comme il faut environ 1 000 ans pour que se renouvelle l'oxygène dissous dans les eaux abyssales, il apparaît que, même dans le cas d'une population de 10 milliards d'individus qui se débarrasserait de ses déchets organiques fermentescibles dans les mers, le temps nécessaire à la déplétion de l'oxygène dissous dans les eaux profondes, soit 2 500 ans, serait encore supérieur à son taux de renouvellement [1].

Broecker conclut que la quantité d'oxygène contenue dans l'atmosphère est illimitée par rapport aux besoins humains et qu'il en est de même, bien qu'à un degré moindre, pour celles dissoutes dans l'hydrosphère. Cet auteur écrit : *"si l'existence de l'espèce humaine est sérieusement menacée par la pollution de l'environnement, elle succombera à quelque autre péril longtemps avant que ses ressources en oxygène n'aient été sérieusement entamées".*

(1) Remarquons toutefois que de telles considérations n'excluent pas l'éventualité d'une déplétion marquée du taux d'oxygène dissout dans les eaux marines en des zones localement très polluées de l'océan : Baies ou estuaires, ainsi qu'en des mers fermées.

BCU LAUSANNE / CENTRE DE BIOLOGIE

PERTURBATION DU CYCLE DE L'AZOTE

L'action de l'homme sur le cycle de l'azote est complexe. Sans être le principal facteur perturbateur, la pollution atmosphérique intervient de façon significative dans les multiples modalités par lesquelles la civilisation industrielle interfère avec ce cycle biogéochimique.

Chaque automobile dégage en moyenne 60 kg d'oxydes d'azote par an. Comme le parc automobile nord-américain compte environ 100 millions de véhicules, on voit que ces derniers libèrent chaque année environ 6×10^6 tonnes d'oxydes d'azote dans l'atmosphère. On a d'ailleurs pu montrer l'existence d'une corrélation positive entre la consommation d'essence en divers Etats américains et le taux d'azote minéral contenu dans les eaux de précipitation locales. Compris entre 0,15 et 0,2 ppm dans les pluies prélevées dans des Etats où cette consommation est de 10^9 gallons par an, cette concentration s'élève en moyenne à 0,45 ppm dans ceux où la quantité annuelle d'essence utilisée par les automobiles est de $3,5 \times 10^9$ gallons (d'après Lodge, dans Commoner, 1970).

Cependant, la fixation industrielle de l'azote atmosphérique afin de produire des engrais chimiques constitue incontestablement la principale cause de modification du cycle biogéochimique de cet élément. Aussi étudierons-nous plus en détail, par la suite, l'impact de l'homme sur ce dernier (cf. chap. V, p.253).

PERTURBATION DU CYCLE DU SOUFRE

Le soufre est un élément assez rare dans la lithosphère. L'analyse révèle que les roches en renferment trop peu — il s'en faut d'un facteur 3 — pour que la seule érosion puisse rendre compte de la quantité moyenne de sulfate renfermée par l'ensemble des eaux fluviales du monde. En réalité, les trois quarts de cette masse proviennent de l'atmosphère où elle se forme par oxydation des composés volatils du soufre (hydrogène sulfuré et anhydride sulfureux. Elle est ramenée au sol sous forme de sulfate d'ammonium et aussi d'acide sulfurique. Il existe donc un certain couplage entre les cycles biogéochimiques du soufre et de l'azote (Deevey, 1970).

On estime que l'érosion n'entraîne chaque année dans les fleuves, par lessivage des roches superficielles, que 14×10^6 tonnes de soufre sous forme de sulfates, alors que les précipitations amènent 48×10^6 t/an de cet élément aux eaux superficielles continentales (Fig. 4.28).

Les pluies et la dissolution gazeuse apportent à l'océan 71×10^6 et 25×10^6 t/an de soufre respectivement.

Une partie des sulfates présents dans l'atmosphère sont absorbés et utilisés *via* les sols par les producteurs primaires (26×10^6 t/an de soufre) et en outre, l'homme en apporte 11×10^6 t/an aux agro-écosystèmes sous forme de fumure minérale (engrais chimiques).

BUNTING-DRURY UNIVERSITY LIBRARY

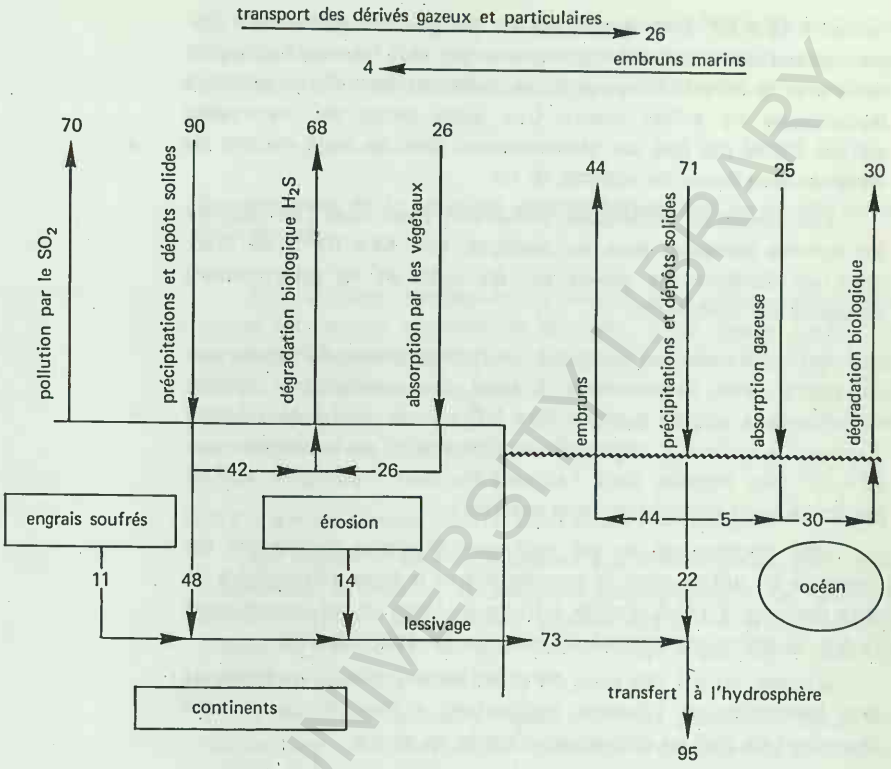


Figure 4.28
Interférence entre la pollution atmosphérique et le cycle biogéochimique du soufre (les chiffres expriment des millions de tonnes de soufre par an). D'après Robinson et Robbins in *Singer, Reidel ed., 1970, p. 53.*

A l'image de ce que l'on observe dans le cycle du carbone, une partie du soufre entraîné dans les océans par les précipitations et les eaux continentales, soit au total 95×10^6 t/an, se sédimenterait au fond des mers.

Le cycle du soufre est bouclé par l'existence d'échanges dans le sens continents et hydrosphère ⟶ atmosphère.

Tant en milieu marin que terrestre, des décomposeurs finissent par dégrader le soufre organique, constitué essentiellement d'acides aminés soufrés (cystéine, méthionine) dont le rôle biologique est fondamental car ce sont eux qui assurent la configuration tertiaire des protéines.

Cette minéralisation du soufre incorporé à la biomasse s'effectue dans des conditions très particulières. Elle n'a lieu que dans les sols réducteurs et dans les vases et les boues dépourvues d'oxygène qui se rencontrent dans le fond des lacs et des marécages eutrophes ainsi que dans certaines zones littorales.

Nous avons déjà étudié ces phénomènes (cf. chap. I,p. 60). Rappelons qu'ils sont le fait de toute une série de micro-organismes (champignons et bactéries). Après minéralisation du soufre organique, les sulfates sont réduits par des bactéries hétérotrophes anaérobies, *(Desulfovibrio* par exemple) qui produisent de l'hydrogène sulfuré. Celui-ci se dégage *pro parte* dans l'atmosphère. On

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

évalue à 68×10^6 t/an la quantité de soufre ainsi rejetée dans l'air par les bactéries sulforéductrices terrestres sous forme d'hydrogène sulfuré et à 30×10^6 t/an celle produite par les micro-organismes homologues en milieu marin. Une autre partie de l'hydrogène sulfuré formé est fixé par sédimentation dans les eaux neutres ou alcalines sous forme de sulfures de fer.

Les tempêtes océaniques entraînent aussi dans l'atmosphère les sulfates contenus dans les embruns, soit 44×10^6 t de S/an, dont un dixième est amené par les vents et les précipitations au-dessus des continents.

Enfin, la pollution constitue un facteur récent d'introduction du soufre dans l'atmosphère. L'usage des combustibles fossiles entraîne dans celle-ci quelque 70×10^6 t/an de soufre sous forme d'anhydride sulfureux, masse très considérable si on la compare aux 98×10^6 t/an rejetées dans l'atmosphère avec l'hydrogène sulfuré par les facteurs biogéochimiques naturels !

Une fraction de ce gaz sulfureux d'origine industrielle est convertie en sulfate dans la troposphère et la basse stratosphère, le reste demeure à l'état d'acide sulfurique. Dans un cas comme dans l'autre, ce soufre est restitué aux sols par les précipitations.

L'étude du pH des eaux de pluie (Oden, 1969), en Suède et dans l'ensemble de l'Europe occidentale, a montré que celles-ci devenaient de plus en plus acides d'année en année.

En 1956, leur pH n'était légèrement inférieur à 5 que dans la partie méridionale de la mer du Nord, au-dessus du Bénélux et à l'ouest de l'Angleterre (fig. 4.2). En 1965 apparaît une considérable diminution, de plus d'une unité de pH en moyenne. Dans deux zones sises dans le nord de la Hollande et de part et d'autre du détroit du Sund, le pH moyen des pluies est même devenu inférieur à 4 (fig. 4.2).

Outre les dégâts causés aux édifices par ces eaux pluviales acides, la baisse du pH provoquée par celles-ci dans les lacs de Suède situés sur des terrains silicieux présente déjà de graves conséquences au point de vue limnologique. Il s'ensuit une baisse sensible de productivité des eaux lacustres ainsi contaminées dont la faune s'appauvrit beaucoup.

En conclusion, l'impact de l'homme sur le cycle biogéochimique du soufre est déjà très préoccupant. Il serait temps que la société industrielle moderne révise de façon radicale ses techniques d'utilisation des combustibles fossiles. Quoi qu'en disent divers groupes d'intérêt, la désulfuration des combustibles fossiles est actuellement possible, à la fois sur les plans technique et économique (cf. par exemple Squires, 1972).

Ce n'est pas l'installation de détecteurs de gaz sulfureux dans les agglomérations industrielles les plus polluées qui résoudra le problème de la contamination de l'atmosphère par ce gaz. Seule l'adoption des mesures radicales sur les plans législatif et technique

SOUTHAMPTON INSTITUTE LIBRARY SERVICES LTD UNIVERSITY LIBRARY

par l'ensemble des pays européens permettra de mettre un terme à la pollution de l'air par le gaz sulfureux et aux redoutables problèmes d'environnement et d'hygiène publique qui en découlent.

Conséquences de la pollution atmosphérique pour les espèces et les biocœnoses

La pollution atmosphérique exerce une action néfaste sur toutes les espèces végétales ou animales. Il en résulte parfois de véritables bouleversements biocœnotiques aux conséquences désastreuses, non seulement au point de vue de la conservation de la nature, mais aussi sur le plan agronomique (dégâts aux cultures et aux forêts) et sur celui de la santé publique.

EFFETS SUR LES ESPECES VEGETALES ET LES PHYTOCŒNOSES

Les végétaux, tant cryptogames que phanérogames, sont particulièrement sensibles à la pollution atmosphérique. Le degré de sensibilité est tel dans certains groupes systématiques, comme les lichens ou les conifères, que l'on a songé à les utiliser comme indicateurs biologiques de pollution.

L'anhydride sulfureux figure parmi les polluants majeurs de l'atmosphère, non seulement à cause de l'importance de sa concentration dans l'air contaminé mais aussi par suite de sa très grande toxicité pour les végétaux. Les effets néfastes de ce polluant sur les plantes auraient déjà été signalés il y a plus d'un siècle en Europe (voir Linzen, 1971).

Effets de l'anhydride sulfureux sur les Phanérogames.

Les dégâts causés aux dicotylédones par l'anhydride sulfureux se caractérisent par des lésions foliaires bifaciales, qui s'étendent entre les nervures mais respectent ces dernières. Il s'agit d'altérations nécrotiques provoquées par l'accumulation de sulfites, puis de sulfates, dans le parenchyme foliaire. Celles-ci sont souvent plus importantes autour du pétiole. Chez les monocotylédones, il apparaît des lésions internervaires longitudinales, souvent marquées à partir de l'extrémité de la feuille.

Les effets de l'intoxication aiguë par le gaz sulfureux se traduisent par l'apparition de nécroses apicales, de couleur rouge ou orangée.

Les troubles chroniques induits par l'exposition permanente des plantes à la présence de concentrations subléthales de gaz sulfureux dans l'air se manifestent par un jaunissement d'ensemble de la feuille chez les angiospermes.

Il en est de même chez les conifères où ils sont marqués par l'apparition d'une coloration jaune-verdâtre sur les aiguilles attaquées, qui s'étend peu à peu de l'apex vers la base.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Examiné à un stade précoce de l'intoxication, le parenchyme foliaire montre à l'examen microscopique des zones flaccides, gonflées d'eau, de couleur gris vert. Dans ces dernières, la chlorophylle semble avoir diffusé à l'intérieur des chloroplastes et s'être répandue dans le hyaloplasme des cellules lésées.

Il existe de grandes différences dans la sensibilité aux gaz sulfureux selon les espèces végétales.

Par ordre de tolérance croissante, on rencontre divers champignons, les lichens, les conifères, les végétaux herbacés et les arbres à feuilles caduques.

Parmi les plantes cultivées, les espèces fourragères (luzerne en particulier), le cotonnier, diverses composées (endives, laitues) sont des plus sensibles. Puis viennent les céréales et les crucifères. En revanche, le maïs, la vigne et les rosacées arborescentes (*Pirus, Malus, Amygdalus*) seraient assez tolérants à ce gaz.

Les mauvaises herbes (adventices) des cultures sont en général aussi sensibles que les autres végétaux au gaz sulfureux. Cependant, certaines d'entre elles comme *Anagallis arvensis, Stellaria media* et *Plantago lanceolata* sont très résistantes, de sorte que leur abondance peut être considérée comme un indicateur biologique de pollution par ce gaz (De Cormis, 1970).

Les conifères sont très sensibles au gaz sulfureux SO_2 : pins sylvestres et épicéas subissent en particulier de graves dommages dans les zones contaminées.

Les arbres à feuilles caduques peuvent aussi être atteints ; ainsi, Bossavy (1970) signale des lésions foliaires par l'anhydride sulfureux sur divers feuillus (châtaignier, bouleau), dans les forêts domaniales aux alentours de Rouen, résultant de la pollution de l'air due aux installations pétrochimiques situées dans cette région.

Les doses auxquelles apparaissent les premiers troubles physiologiques sont des plus variables selon l'espèce et donc difficiles à déterminer. Aucune plante ne résiste pendant un temps prolongé à 1 ppm de gaz sulfureux dans l'air. La concentration de 0,1 ppm constitue la limite supérieure susceptible d'être supportée en permanence par la plupart des phanérogames.

Effets sur les cryptogames

La sensibilité des champignons au gaz sulfureux et de façon générale aux dérivés du soufre, est bien connue. Elle est d'ailleurs mise à profit dans la lutte contre les espèces phytopathogènes nuisibles aux cultures.

On a mis en rapport l'absence complète de diverses urédinales et la rareté des rouilles et des charbons sur les plantes cultivées dans les serres et les cultures maraîchères situées aux environs des agglomérations industrielles avec la teneur excessive en anhydride sulfureux de ces régions (Mellanby, 1970).

Les lichens sont aussi extrêmement sensibles au gaz sulfureux et disparaissent de façon irrémédiable lorsque sa concentration

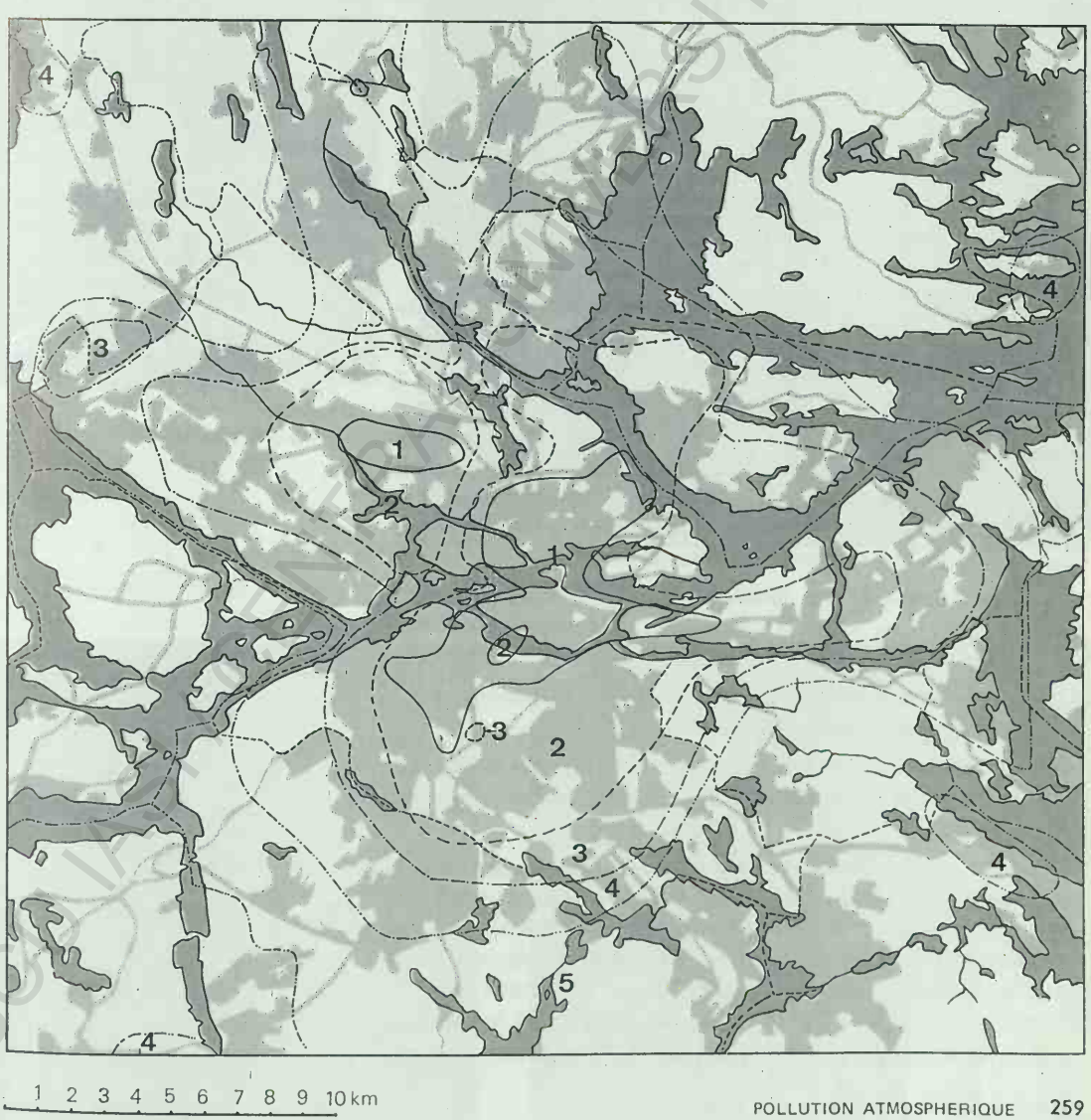
BOUVET CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

atteint 35 ppb ! Or, la teneur moyenne de l'atmosphère des grandes villes est de 100 ppb. Aussi, la plupart des lichens ont-ils disparu depuis longtemps des zones centrales de ces agglomérations les plus polluées.

Fenton (1961-64) a étudié la flore lichénologique des environs de Belfast. Cet auteur a montré que le pourcentage de couverture du tronc des arbres par ces épiphytes s'accroît de façon linéaire au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la ville : c'est-à-dire au fur et à mesure que décroît la teneur de l'atmosphère en anhydride sulfureux.

Skye (1968) a effectué de très minutieuses recherches sur les effets de la pollution de l'air sur les lichens épiphytes dans la région de Stockholm. Cet auteur distingue cinq zones concentriques à l'intérieur du périmètre urbain (Fig. 4.29) qui corres-

Figure 4.29
Carte de la région de Stockholm montrant sa subdivision en cinq zones de pollution décroissante du centre vers la périphérie et dont la flore lichénologique est de plus en plus diversifiée. D'après Skye, Acta geographica Suecica, 52, 1968, p. 24



pondent à des aires dans lesquelles la flore lichénologique est de plus en plus abondante et variée :

— La zone I, celle des quartiers centraux, est un véritable désert pour les lichens. Elle est pratiquement dépourvue de ces cryptogames. Les troncs d'arbres des parcs sont recouverts par des algues qui se sont substituées aux lichens.

— La zone II renferme quelques lichens crustacés particulièrement résistants comme *Lecanora conizaeoides* et des espèces foliacées... *Hypogymnia physodes,* et dans une moindre mesure *Parmelia sulcata.*

— La zone III dans laquelle la flore lichénologique est encore rare, mais où l'on commence à observer quelques espèces de lichens fructiculeux comme *Cladonia coniocraea.*

— La zone IV, où la flore est assez diversifiée et la couverture des troncs par des lichens épiphytes devient assez importante. On y rencontre un certain nombre d'espèces fructiculeuses comme *Ramalina farinacea.*

— La zone V, dans laquelle la pollution est faible ou nulle et où la flore lichénologique est normale, tant au point de vue de la diversité spécifique que du nombre d'individus. Certaines espèces que l'on y observe, comme *Baccidia luteola* et *Ramalina fraxinea,* peuvent être considérées comme indicatrices d'un air pur ou fort peu pollué.

Dans cette même zone, les espèces particulières aux aires contaminées, comme *Leconora conizaeoides,* disparaissent complètement des arbres à feuilles caduques.

Skye (1968) a aussi étudié expérimentalement les effets sur les lichens d'une exposition au gaz sulfureux. Il a montré que ces derniers changeaient de couleur et finissaient par tomber des troncs des arbres. La fumigation par ce gaz du tronc d'un chêne détruit sa couverture lichénique. Celle-ci n'est pas encore reconstituée plus de quatre ans après le traitement expérimental !

L'exposition à de plus faibles doses modifie le port du thalle des lichens, dont les lobes ne s'accroissent plus verticalement mais latéralement.

Pourquoi les lichens possèdent-ils une telle sensibilité au gaz sulfureux et de façon générale à la pollution atmosphérique ?

Cela résulte de l'écophysiologie très particulière de ces cryptogames qui vivent en épiphytes sur des substrats stériles ou pauvres en éléments nutritifs : rochers ou écorces.

Aussi, ces organismes possèdent la capacité d'absorber diverses substances à partir de dilutions extraordinaires car ils dépendent presque entièrement des composés dissous et entraînés aux sols par les eaux pluviales pour leur approvisionnement en éléments minéraux indispensables. Cela explique pourquoi les lichens peuvent accumuler des quantités considérables de soufre dans leurs tissus par suite de la pollution de l'air par l'anhydride sulfureux.

Planche XV

Les lichens, par suite de leur vie épigée, constituent de remarquables bioindicateurs de la pollution de l'air.

1) Lichens fructiculeux (Usnea) *et foliacés* (Parmelia) *sur un tronc d'arbre à feuilles caduques*

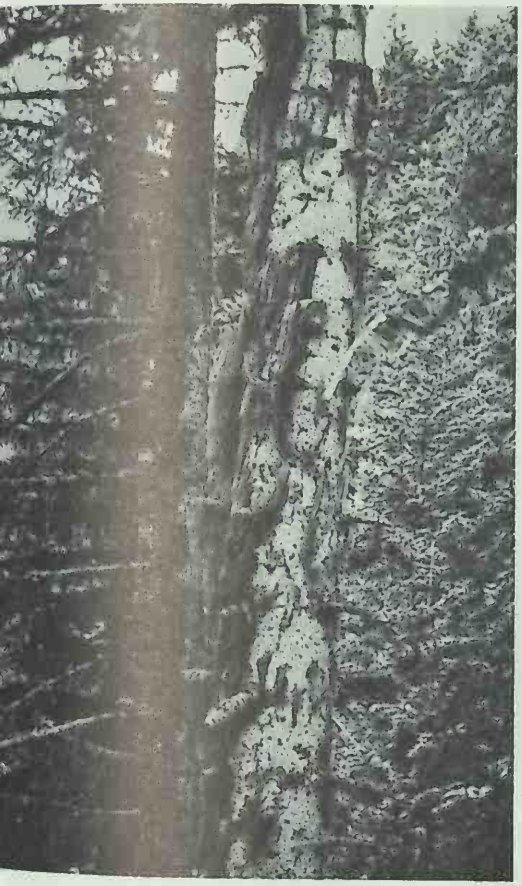
*2) Tronc d'épicéa entièrement recouvert d'un feutrage d'*Usnea, *dont les thalles buissonnants, ramifiés, atteignent plusieurs décimètres de long*

3) Vue de détail d'un lichen corticole du genre Parmelia

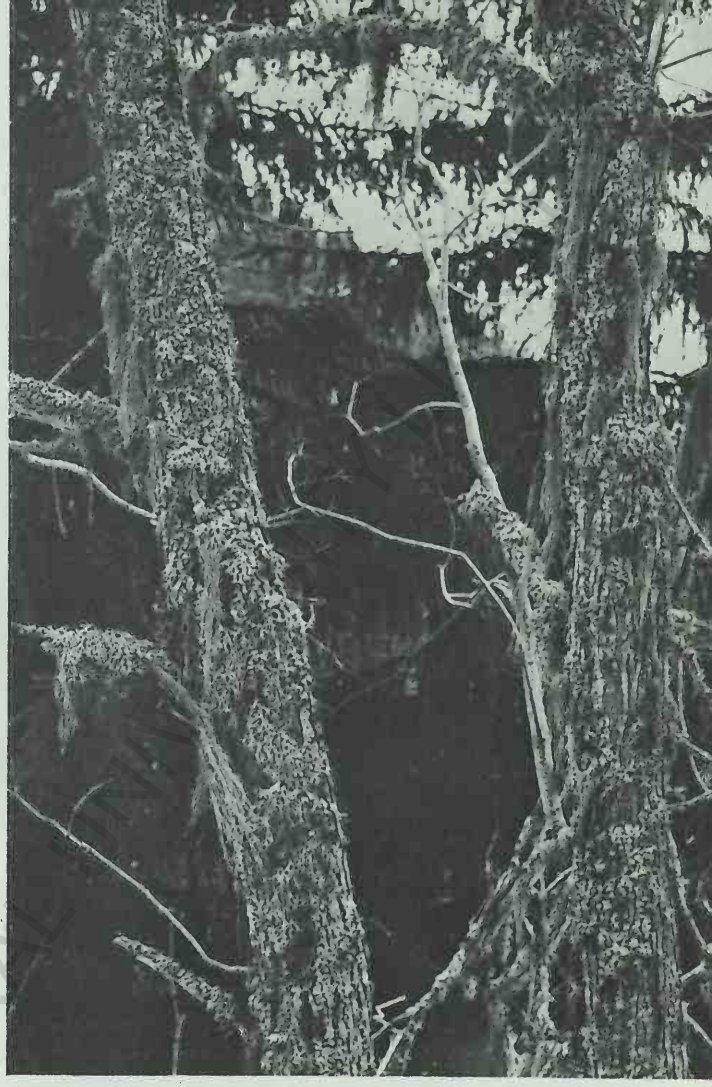
4) Pierre entièrement recouverte par divers lichens crustacés, en particulier du genre Rhizocarpon

(Clichés F. Ramade)

SUNY CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

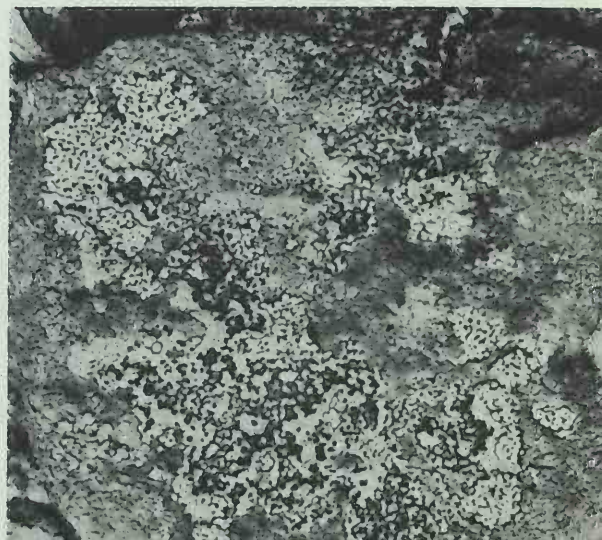


2



1

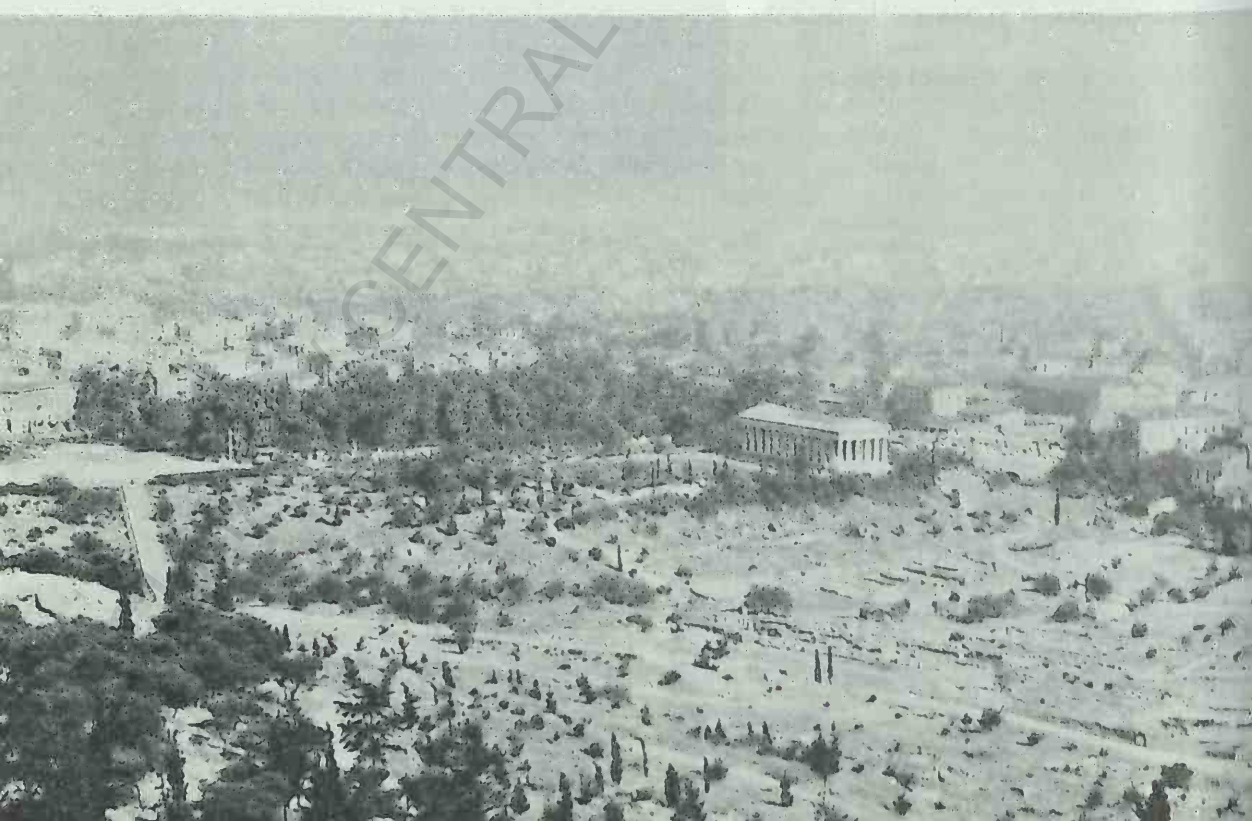
3



4

1

2



CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Gilbert (1965) a montré que des *Parmelia saxatilis* (lichen foliacé) croissant sur un grès à 6 km d'un centre de pollution renfermaient 2 870 ppm de soufre ; des individus prélevés à 14 km de la zone contaminée n'en renfermaient plus que 645 ppm. La concentration n'était plus que de 225 ppm dans les échantillons recueillis à 34 km de la zone considérée ! *Parmelia saxatilis* accumule donc le soufre à une teneur supérieure à celle qui correspondrait aux exigences nutritives de cette espèce lorsqu'elle se développe dans des atmosphères urbaines contaminées par l'anhydride sulfureux.

Cette particularité propre aux lichens de stocker dans leur thalle des substances diluées dans l'air explique aussi le fait qu'ils accumulent les radioéléments contenus dans les retombées consécutives aux expériences nucléaires, à de plus fortes concentrations que les phanérogames. Tel est par exemple le cas des *Cladonia* qui constituent la base de la nourriture des rennes dans les régions subarctiques.

Planche XVI

1) L'incinération "sauvage" de déchets plus ou moins combustibles constitue une importante source de pollution dans les zones industrielles. Ici des emballages (plastiques et cartons) sont brûlés en plein air par une brasserie, au mépris de toute réglementation existante . . .

2) Pollution atmosphérique dans la ville d'Athènes : la pollution de l'air peut aussi se manifester dans les cités sises sous les climats les plus ensoleillés et atténuer la visibilité, même en l'absence de smogs. Le cliché a été pris par une belle journée de juillet, vers dix heures du matin, du sommet de la colline de l'Acropole. Il révèle la présence d'un dôme de pollution qui opacifie l'atmosphère, et que l'on peut mettre en rapport avec l'intensité de la circulation automobile, non négligeable dans cette ville.

(Clichés F. Ramade).

Mode d'action du gaz sulfureux

Par quelles modalités l'anydride sulfureux perturbe-t-il la physiologie de la plante ? Plusieurs expériences récentes suggèrent qu'il entre en compétition avec le gaz carbonique au cours de la phase lumineuse de la synthèse chlorophyllienne. Rao et Leblanc (1966) ont montré que chez les lichens, l'exposition pendant 24 h à 5 ppm de gaz sulfureux provoquait toute une série de divergences par rapport à l'état physiologique normal. Il apparaît dans les chloroplastes de l'algue symbiotique *(Trebouxia)* des taches brunes qui seraient dues à une décomposition de la chlorophylle *a* en phaeophytine *a* et magnésium.

Par ailleurs, l'anhydride sulfureux est décomposé en présence de lumière et rejeté à l'extérieur sous forme d'hydrogène sulfuré. Il y a donc compétition entre le gaz sulfureux et le gaz carbonique pendant la phase obscure de la photosynthèse. Cette interférence entre anhydride sulfureux et assimilation chlorophyllienne est aussi démontrée par l'étude de l'action de ce gaz sur la pomme de terre. La lumière est indispensable pour que cette plante rejette de l'hydrogène sulfuré lorsqu'elle est en présence d'un air contaminé par le gaz sulfureux. Il ne s'agit pas d'une simple rétention physiologique qui interdirait son rejet dans l'obscurité puisque cette plante garde ses stomates ouverts pendans la nuit.

Cependant, une partie du soufre est aussi incorporée au cours de la photosynthèse. L'usage de $^{35}SO_2$ a montré que le chou *(Brassica oleracea)* fixait le S^{35} dans un glucoside, la glucobrassicine.

D'autres recherches montrent qu'une partie du soufre provenant du gaz sulfureux est incorporée dans la cystéine puis dans les protéines synthétisées par le végétal. Enfin, une partie du soufre exogène apporté par le gaz sulfureux est éliminée par les racines qui le rejettent dans le sol sous forme de sulfate.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La relation entre l'activité photosynthétique de la plante et la réduction du gaz sulfureux est donc évidente. Par ailleurs, l'effet de ce gaz sur les végétaux semble proportionnel au temps d'exposition et au niveau de pollution. Cette action phytotoxique paraît être de type cumulatif, ce qui rend aléatoire la fixation de niveaux de tolérance.

Composés nitrés

Parmi les oxydes d'azote, seul le NO_2 est phytotoxique à faible concentration. L'exposition de plants de tomates à moins de 0,5 ppm de NO_2 inhibe la croissance de ce végétal si elle persiste plus de 10 jours, bien qu'aucune trace de lésions foliaires ne soit décelable. Les nécroses n'apparaissent qu'à une concentration supérieure à 6 ppm.

Les peroxy acyl-nitrates causent des lésions foliaires caractérisées par l'apparition d'une teinte argentée vitreuse ou métallique à la face inférieure des feuilles, à partir de concentrations aussi faibles que 10 ppb. Cet aspect luisant provient de la formation de vastes poches gazeuses qui compriment les cellules parenchymateuses.

L'exposition continue à des doses inférieures à 10 ppb de PAN inhibent la photosynthèse chez les solanées.

L'*ozone* est aussi très dangereux pour les végétaux. Ses effets se manifestent à partir de 50 ppb et il provoque à 100 ppb le dépérissement de nombreuses plantes herbacées ou ligneuses. Ceux-ci se traduisent par l'apparition de petites taches nécrotiques dispersées sur la face supérieure du limbe foliaire. On a mis récemment en évidence un effet de synergisme entre l'ozone et le gaz sulfureux : 100 ppb de chacun de ces composés prises isolément présentent une action toxique beaucoup plus faible pour les conifères que lorsqu'elles sont en mélange (Dochinger et coll, 1970).

Le *fluor* est un élément toxique, dont le rôle dans la physiologie normale de la plante est très marginal. S'il est présent dans l'air à des concentrations inhabituelles, il pénètre par les stomates et s'accumule peu à peu dans le système foliaire où il peut atteindre des taux considérables. Bossavy (1970) cite à titre d'exemple les valeurs relevées lors d'analyses effectuées sur divers végétaux en Maurienne (Tableau XXXV).

L'intoxication fluorée des plantes se traduit par l'apparition de nécroses du parenchyme foliaire, de couleur d'abord grise ou gris vert, puis marron, qui s'étendent de l'apex vers la base du limbe et affectent sans distinction parenchyme et nervures.

La pollution fluorée atteint en effet aujourd'hui des niveaux considérables dans cette vallée alpine par suite de l'installation fort ancienne de nombreuses unités d'électrochimie de l'alumine.

SCIENCES CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XXXV — Pollution fluorée de la végétation en vallée de Maurienne (*)

Végétal	*Taux de fluor en mg/kg de matière sèche aux dates de prélèvement correspondantes*		
	24/6/66	1/8/66	11/10/66
Vigne polluée	230	858	1 439
témoin	22	16	23
Mélèze (pas de témoin)	686	1 764	1 834
Sapin	1 965**	1 964	< 1 963
alt. 1 200 m	170	200	308
1 600 m	50	100	150

* D'après Bossavy (1970).
** Année de pousse de l'aiguille.

Le tableau XXXV montre que la concentration du fluor dans les feuilles des végétaux prélevées en zone polluée est d'autant plus grande que ces organes sont plus âgés, signe indiscutable de l'effet cumulatif de l'intoxication fluorée. Au contraire, ce taux ne varie pas dans les échantillons pris dans des localités-témoins indemnes de pollution.

Certaines espèces végétales présentent des troubles physiologiques à la suite d'exposition à des concentrations de fluor inférieures à 1 ppb : on a signalé des nécroses foliaires à 0,1 ppb !

Les liliacées, les gentianes, les conifères (pin sylvestre, épicéa) sont particulièrement sensibles à cet élément.

Les plantes cultivées sont toutes très vulnérables, en particulier les arbres fruitiers : aucun verger d'abricotier ne peut survivre au voisinage d'une usine de traitement de l'alumine.

Chez les conifères, les nécroses foliaires apparaissent pour des concentrations de l'ordre de 60 à 100 ppb (dans l'atmosphère). Il s'ensuit une subite défoliation qui entraîne la mort de l'individu.

Parmi les autres polluants gazeux ayant une influence sur les végétaux, nous citerons l'éthylène et ses oxydes. Ces composés peuvent causer des dommages aux plantes à des concentrations aussi faibles que 10 ppb. A de telles dilutions, l'éthylène provoque une vacuolisation des cellules, des troubles de la respiration et finalement une défoliation totale de la plante. L'exposition d'une composée africaine voisine du souci pendant 24 h à 1 ppb de ce gaz produit un flétrissement de ce végétal ! Le cotonnier et le pêcher sont très sensibles à l'éthylène alors que les betteraves, le trèfle et le sorgho sont assez résistants.

Le *plomb* rejeté dans l'atmosphère par les gaz d'échappement d'automobile se dépose sur la végétation et pénètre dans les sols où il peut demeurer très longtemps par suite de sa faible solubilité. Rühling et Tyler (1968) ont montré que cet élément pouvait

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

s'accumuler dans les mousses (*Hyloconium, Pleurozium* et *Hypnum).* Leurs recherches sur les résidus de plomb dans des végétaux de ces genres conservés en herbier en Suède depuis 1860, ont montré que la concentration de ce métal avait tendance à s'accroître à l'intérieur de leurs tissus. On peut mettre ce fait en rapport avec la consommation croissante de carburants au plomb tétraéthyle (Fig. 4.30).

Le coût total des dommages causés par la pollution atmosphérique aux végétaux cultivés est très considérable. Ces dommages ont été évalués, pour l'ensemble des Etats-Unis, à plus d'un demi-milliard de dollars en 1968 ! Dans le seul Etat de Californie, ils excèdent 100 millions de dollars par an ; de plus, les zones sinistrées s'étendent sans cesse (Fig. 4.31).

Il n'existe pas d'estimation précise de ces dommages en Europe. Cependant, une enquête, effectuée en 1968 sur les dégâts causés par la pollution de l'air aux forêts dans la C.E.E., évaluait à quelque 400 000 hectares la surface forestière menacée de disparaître dans la décennie à venir !

En France, Bossavy (1970) estime qu'en Maurienne, 3 000 hectares de conifères sont condamnés par la pollution fluorée. Il précise que 55 % du bois prélevé au cours des dix dernières années dans cette région l'a été sur des arbres morts sur pieds. Dès 1960, 1 200 hectares de *Pinus sylvestris* situés autour d'une usine émettant du fluor avaient déjà disparu. Bossavy insiste sur les difficultés de recolonisation par d'autres espèces arbustives des pentes laissées nues dans cette vallée alpine. En effet, les arbres à feuilles caduques, plus résistants, se développent mal par suite de l'altitude et l'absence de couvert végétal favorise les risques d'éboulements, de glissements de terrain, de coulées de boue, etc.

Le conflit d'intérêt entre pollueurs et agriculteurs ayant eu le plus grand retentissement en France est sans doute celui de Lacq. Dans un procès intenté par les coopératives agricoles voisines aux sociétés exploitant le complexe pétrochimique, le Tribunal de Pau a condamné ces dernières (le 24/2/71) à indemniser les agriculteurs pour les dommages qu'ils ont subis par suite des émanations de l'usine de désulfuration du gaz naturel.

Soulignons à ce propos l'étendue des pertes irrémédiables que peuvent provoquer aux ressources naturelles des opérations d'installation ou d'expansion industrielles faites de façon incohérente, comme c'est souvent le cas. En réalité, toute opération d'aménagement du territoire devrait être réalisée en tenant compte d'un certain nombre de principes écologiques de base afin d'utiliser de façon rationnelle les ressources naturelles. Il est indispensable d'établir au plus vite une carte de la vocation agricole des sols et de mettre les zones de haute culture à l'écart de toute intrusion industrielle et de toute urbanisation par une clause rigoureuse de *non aedificandi.* Nous n'en sommes point là. Il semble par exemple que les sociétés pétrolières marquent de nos jours une nette

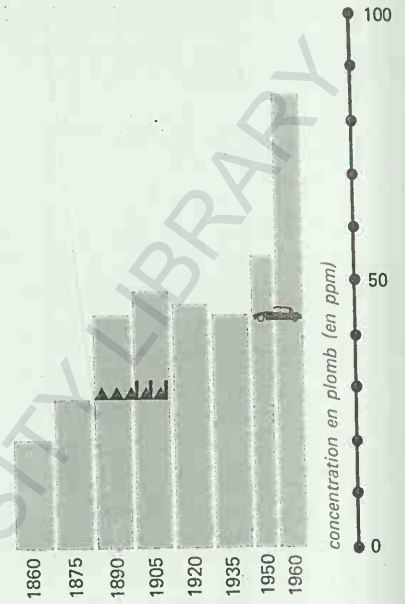


Figure 4.30
Croissance de la teneur en plomb de mousses conservées dans des herbiers du Museum d'Uppsala, récoltées à des époques de moins en moins anciennes. D'après Rühling et Tyler, Botaniska Notiser, 3, 1968.

BOTANY LIBRARY UNIVERSITY OF TORONTO

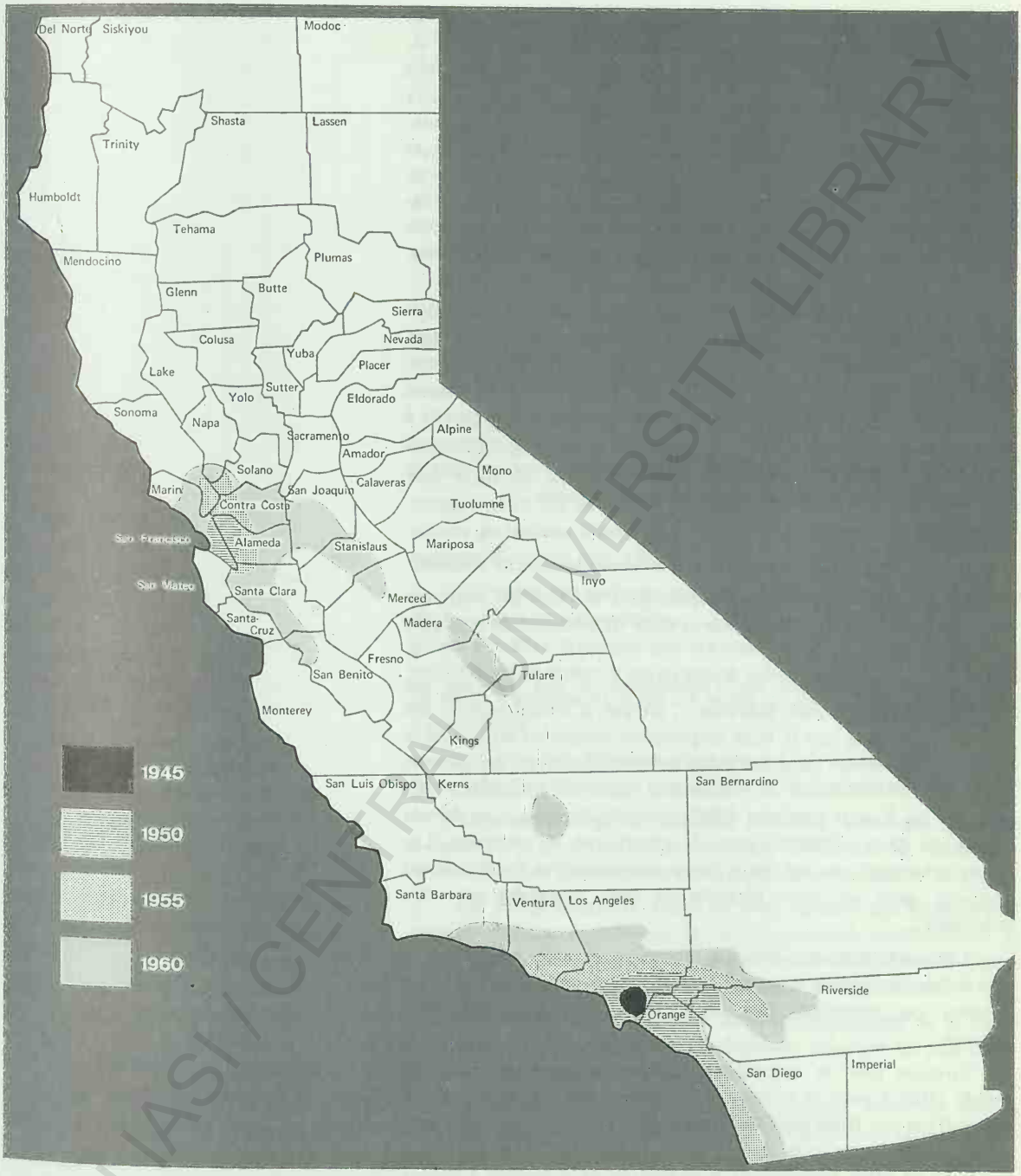


Figure 4.31
Extension des dommages causés aux végétaux par la pollution atmosphérique en Californie. D'après Middleton, Arch. environ. Health, 8, 1964, p. 27.

BU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

prédilection pour implanter ou étendre leurs installations dans les régions de grands crûs! Ainsi, une raffinerie s'est-elle installée au cœur du Médoc et la pollution de l'air qu'elle engendre a déjà provoqué la perte de récoltes réputées (Branche, 1971) ; une autre projette de le faire en plein vignoble de Beaujolais (Theolleyre, 1971). Que penser de l'argument des promoteurs de ce projet "d'aménagement" qui mettent en balance les 150 millions de francs par an que rapporterait la raffinerie sur une surface de 200 hectares avec les 240 millions de francs que produit "à peine" chaque année le vignoble de Beaujolais sur 16 000 hectares ?

De tels propos illustrent bien à quelles aberrations conduit la pensée technocratique qui caractérise aussi la civilisation contemporaine. Elle "omet" systématiquement de comptabiliser les dommages causés au milieu naturel et aux êtres vivants par le mauvais usage de la technologie et la recherche de l'expansion industrielle à tout prix. Une réévaluation de ces effets et de leurs conséquences écologiques montrerait que le PNB s'élève beaucoup moins, dans de telles conditions, que l'on voudrait nous en persuader.

EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SUR LES ANIMAUX ET L'HOMME

De tous les polluants atmosphériques le fluor est celui qui cause les accidents les plus fréquents chez les animaux domestiques (Lillie, 1970).

Dans la plupart des cas, l'intoxication a lieu non pas par inhalation mais par voie indirecte. C'est par la contamination des chaînes trophiques que le fluor empoisonne lentement les bovins et les ovins qui paissent dans des zones polluées. En effet, cet élément n'est pas métabolisable et s'accumule dans le cytoplasme des végétaux où il peut atteindre 2000 mg/kg de tissu sec. Les dérivés gazeux du fluor pénètrent dans la plante par les stomates. Les autres retombent au sol sous forme de poussières insolubles ou dissoutes dans les eaux pluviales et sont absorbées par voie radiculaire.

L'alimentation des animaux domestiques avec ces végétaux contaminés les expose à des concentrations excessives de fluor, qui finissent par provoquer une intoxication chronique dénommée *fluorose.*

Toxique pour le cytoplasme, le fluor possède en outre une grande affinité pour le calcium et par suite perturbe les processus de calcification. Nous avons ici l'exemple d'une substance indispensable à faibles doses mais toxique quand elle se présente en excès. Le fluor est en effet nécessaire à l'ossification et augmente à faibles doses la dureté du tissu dentaire et la résistance à la carie. La fluorose se traduit par divers troubles de gravité croissante. Les premiers symptômes sont de nature dentaire : les dents deviennent moins résistantes et présentent des marbrures. Puis on observe des déformations osseuses. Une alimentation prolongée avec une nour-

CONCORDIA UNIVERSITY LIBRARY

riture contaminée par un excès de fluor provoque une cachexie progressive des animaux domestiques. La concentration maximale que les bovins peuvent supporter dans leur alimentation est de 30 à 50 ppm de fluor. Elle s'élève à 100 ppm pour les ovins et le porc et à 300 ppm pour les poules (d'après Lillie, 1970).

Dans les cas d'intoxication modérée, on note une baisse de la production laitière associée à une diminution du taux de lipides du lait (Udall et Keller, 1952). Les animaux morts de fluorose montrent à la dissection des nécroses des reins et des glandes surrénales ainsi que des lésions du tube digestif.

Enfin, la pollution par le fluor appauvrit beaucoup l'entomofaune car la plupart de ses dérivés minéraux sont de puissants insecticides. Ainsi les ruchers se maintiennent-ils difficilement dans les régions où sévit la pollution fluorée, car les abeilles y sont très sensibles.

Le plomb représente le seul autre contaminant atmosphérique ayant donné de sérieux accidents, mais certes limités, à la suite de son ingestion par les animaux domestiques. Ces derniers ont été signalés chez les bovins et des ovins nourris dans des pâturages voisins de centres d'extraction de minerai ou de fonderies (voir par exemple Butler et coll, 1957).

L'homme apparaît en définitive comme la principale victime de la pollution atmosphérique. Toutes les recherches épidémiologiques actuelles montrent que les populations urbaines en souffrent profondément, même si les effets de cette contamination s'exercent de façon insidieuse et après un temps de latence souvent supérieur à la décennie.

Les enquêtes cliniques révèlent que les smogs accroissent de façon très significatives la morbidité et la mortalité dans les villes.

Le célèbre smog de Londres, en 1952, provoqua du 5 au 9 décembre la mort de 4 000 personnes, tandis que des dizaines de milliers d'autres présentèrent des troubles broncho-pulmonaires.

Les smogs oxydants, riches en PAN, causent une forte inflammation oculaire, caractérisée par une hyperhémie conjonctivale. A Los Angeles, on a signalé de graves accidents ophtalmologiques chez des individus particulièrement sensibles à ces composés.

Cependant, ce sont surtout les effets chroniques de la pollution atmosphérique, dont les conséquences s'avèrent les plus pernicieuses pour la santé humaine.

Parmi les affections en progrès constant dans les centres urbains, citons la bronchite chronique, l'emphysème, diverses manifestations allergiques, dont l'asthme est la plus spectaculaire, et enfin le cancer du poumon.

En Grande Bretagne, pays très industrialisé, 10 % de la mortalité totale résulterait de la bronchite chronique, et 21 % des hommes de la classe d'âge comprise entre 40 et 59 ans en seraient atteints. Au Japon, 60 % de la population de la ville de

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Kawasaki souffrirait de cette affection, ce qui constitue un record ([1]) peu enviable ! La bronchite chronique se traduit par une toux sèche, accompagnée de fréquentes expectorations, puis apparaît progressivement une gêne de la respiration, une hypoventilation pulmonaire qui s'accompagne à long terme de défaillances cardiaques.

Les fumeurs paient un lourd tribut à la bronchite chronique : leur espérance moyenne d'en être affecté après 40 ans est dix fois supérieure à celle des non-fumeurs !

Malheureusement, la pollution atmosphérique joue aussi un rôle déterminant dans l'extension de la maladie. Diverses recherches effectuées en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis ont montré l'existence d'une corrélation fortement positive entre le taux de mortalité par bronchite chronique dans de nombreuses villes, la quantité d'hydrocarbures brûlés chaque jour et la teneur quotidienne de l'air en gaz sulfureux.

L'emphysème pulmonaire est une autre affection respiratoire qui accompagne souvent la précédente et dont la fréquence s'accroît avec l'intensité de la pollution atmosphérique. Elle se caractérise par une dilatation des alvéoles pulmonaires dont les parois s'amincissent et qui s'accompagne d'une perte d'élasticité du parenchyme respiratoire.

L'asthme, affection allergique favorisée par les poussières, est aussi en extension dans les villes. Il se traduit par une gêne respiratoire prolongée et une insuffisance obstructive.

La pollution de l'air joue aussi un rôle significatif, quoique moins important que celui du tabac, dans la pathogénie du cancer broncho-pulmonaire. Cette affection s'accroît depuis plusieurs décennies à un rythme inquiétant. En France, on signalait 3 300 cas en 1943, 5 500 en 1955 et 9 100 en 1963 (Chovin et Roussel, 1968).

La présence d'hydrocarbures polycycliques carcinogènes comme le benzopyrène, le benzanthracène, le fluoranthrène, dans l'atmosphère des villes, joue sans aucun doute un rôle significatif dans l'extension de cette maladie.

Kotin, Falck et Thomas (1956) induisaient expérimentalement, dès cette date, des cancers cutanés de la souris par badigeonnage de la peau de ces rongeurs avec des dérivés oxydés des divers hydrocarbures présents dans l'atmosphère de Los Angeles.

Truhaut (1960) a provoqué la même affection, dans des conditions expérimentales similaires, avec des prélèvements concentrés de poussières extraites de l'atmosphère parisienne.

La silicose ou fibrocytose pulmonaire résulte de l'inhalation de silice et de silicate. Elle se traduit par une accumulation d'histiocytes dans le parenchyme pulmonaire, qui phagocytent ces particules minérales et se transforment en fibrocytes. Cela provoque une sclérification des alvéoles pulmonaires qui perdent de ce fait toute élasticité.

(1) Il y aurait d'ailleurs beaucoup à écrire sur les conséquences écologiques du "miracle" économique japonais. Celui-ci s'accompagne de la destruction accélérée d'une des plus belles natures du monde et a été acquis au prix de graves atteintes à la santé publique de ce pays, dont le bilan reste à faire . . . .

COLUMBIA UNIVERSITY LIBRARY

Le mésothéliome pulmonaire est une maladie évolutive, voisine de la précédente, provoquée par l'inhalation de poussières d'amiante. Elle se manifeste, après une longue période de latence excédant 10 ans et se caractérise par une infiltration fibreuse diffuse du parenchyme pulmonaire et des plèvres (Masters, 1971).

Certains auteurs ont souligné qu'en dehors des expositions industrielles chez les travailleurs en contact avec ce matériau, l'usage accru de l'amiante dans les industries mécaniques (garnitures de frein, embrayages, etc.) s'accompagne d'une pollution de l'air par atomisation de l'amiante au moment du freinage ou de la friction.

Enfin, les diverses particules solides carbonées s'accumulent dans le cytoplasme des macrophages qui les ont phagocytées. Ils se transforment alors en cellules à poussières responsables de la coloration noirâtre que présente, à la dissection, le parenchyme pulmonaire des habitants des villes industrielles.

Outre le système circulatoire, l'appareil cardiovasculaire et le sang peuvent aussi être affectés par la pollution atmosphérique. Le rôle de la fumée de tabac dans la génèse des diverses affections cardiaques ou circulatoires n'entre pas dans le cadre de cet exposé ; cependant, les fumées de tabac renferment des substances que l'on trouve aussi dans les atmosphères polluées, car elles correspondent également à des résidus de combustions. La fumée de tabac accroît de dix fois la fréquence des maladies coronaires chez les fumeurs par rapport au reste de la population et de trois fois la mortalité qui en résulte dans la classe d'âge de 45 à 54 ans selon Hammond (1966).

D'autres recherches ont révélé l'effet anémiant des traces d'oxyde de carbone présentes dans les atmosphères polluées. Ce gaz induit à faibles doses l'apparition d'anémies de type hypochrome. Il apparaît au contraire, dans les centres où sévit une sévère contamination de l'air par des aérosols, une déviation vers le haut de la formule sanguine avec hyperglobulie. Ce phénomène s'observe aussi dans des conditions normales chez les montagnards qui vivent dans une atmosphère raréfiée.

Hickey (1971) insiste sur l'existence de mutagènes puissants parmi les divers polluants de l'air : benzopyrène, autres hydrocarbures polycycliques, dérivés organiques de l'azote. Cet auteur souligne aussi la grave menace génétique constituée par la présence dans les atmosphères urbaines de mutagènes modérément toxiques. De telles substances passeront longtemps inaperçues jusqu'à ce que de très sérieux dommages génotypiques se soient manifestés dans les populations urbaines.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITARA

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE V

Chapitre V — La pollution des sols 273
Modalités et conséquences de la pollution des sols par l'agriculture moderne 274
Le problème des fertilisants 274
Perturbation des cycles biogéochimiques par l'emploi des fertilisants 279
Perturbation du cycle du phosphore 280
La pollution des sols par les pesticides et ses conséquences écologiques 282
Nature des pesticides 283
Particularités écologiques propres aux pesticides 290
Effets des traitements sur les espèces et les biocœnoses 292
Les effets directs 294
Effets indirects des traitements pesticides 297
Diminution de nourriture disponible 306
Disparition d'espèces concurrentes 308
Elimination des ennemis naturels 309
Effets sur la diversité des biocœnoses 312
Effets sur la succession 313
La lutte biologique 313
Méthodes qui influencent la mortalité 315
Méthodes qui affectent la natalité 318

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

V
LA POLLUTION DES SOLS

Au contraire de la pollution de l'air, qui sévit aussi bien à la ville que dans les zones rurales où sont implantées des industries, la pollution des sols affecte par essence les campagnes. Elle est avant tout une conséquence de l'expansion de certaines techniques agricoles modernes. L'agriculture contemporaine doit produire des quantités croissantes d'aliments alors que la surface de terre cultivable, disponible par habitant, diminue sans cesse à cause de l'accroissement démographique et aussi, par suite, de l'extension ininterrompue des villes, de l'industrialisation et d'autres usages non agricoles des sols. Elle y parvient par une intensification des pratiques culturales, qui conduit à perturber de plus en plus le flux d'énergie et le cycle de la matière dans les agroécosystèmes.

Les engrais chimiques augmentent certes les rendements, mais leur application répétée, à de trop fortes doses, conduit à une pollution des sols par les impuretés qu'ils renferment. De plus, les phosphates et les nitrates apportés en excès sont entraînés par les eaux superficielles et contaminent ainsi les nappes phréatiques. De même, les pesticides minéraux ou organiques utilisés pour lutter contre les ennemis des cultures peuvent polluer les sols et la biomasse.

Mais la surface des continents émergés est aussi exposée aux retombées des métaux lourds rejetés dans l'atmosphère sous forme d'aérosols (plomb, mercure, cadmium, molybdène, etc.) ainsi qu'à celle des radionucléides. Dans un cas comme dans l'autre, ces éléments sont ramenés au sol par les précipitations.

Les sols constituent donc, en bien des cas, un intermédiaire obligatoire entre l'atmosphère et l'hydrosphère, pour une fraction de la quantité totale de chaque polluant que l'homme rejette dans l'air. Il est donc logique d'étudier les conséquences de leur pollution avant celles qui résultent de la contamination de l'hydrosphère. La surface des continents émergés occupe en effet une position clef dans les échanges avec les autres milieux. C'est à partir d'elle que sont émis les polluants et par elle qu'ils transitent souvent avant de passer dans l'hydrosphère.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

MODALITES ET CONSEQUENCES DE LA POLLUTION DES SOLS PAR L'AGRICULTURE MODERNE

On peut distinguer, parmi les divers produits chimiques utilisés en agriculture, des substances minérales et des composés organiques de synthèse. Ces derniers sont responsables en quelque sorte d'une pollution "en amont" des sols cultivés. Mais la rupture du cycle de la matière dans les agroécosystèmes modernes a aussi conduit à une contamination "en aval" de certaines terres. En effet, les énormes excédents de déchets solides d'origine agricole, produits soit par les exploitations soit par la consommation urbaine des productions végétales et animales (1), qui se rencontrent dans tous les pays industrialisés, ne sont plus retournés aux champs, à l'opposé des pratiques agricoles traditionnelles. Ils ne sont donc plus recyclés mais entassés dans des décharges où leur fermentation anaérobie produit des composés sulfurés et ammoniacaux toxiques, ce qui entraîne une contamination croissante des sols.

(1) Détritus végétaux ; excreta d'animaux domestiques : purin, fumiers ; résidus ou produits non commercialisables rejetés aux décharges ; ordures ménagères.

L'intensification incessante de l'agriculture, l'usage de quantités sans cesse accrues de substances artificielles (engrais chimiques, pesticides, etc.) nous conduisent lentement mais sûrement vers une contamination irréversible des sols cultivés. Une pollution chimique accompagnée de leur surcharge locale en produits organiques fermentescibles excédentaires compromet de façon inéluctable leur fertilité à long terme.

Seule la transformation en compost des déchets solides riches en matières organiques, associée à une interdiction catégorique de l'usage agricole de substances toxiques non-biodégradables, peut maintenir *ad œternam* la qualité des sols cultivés et leur haute productivité. On est donc en droit de s'interroger sur la validité de diverses méthodes agronomiques modernes si l'on examine leur impact écologique sur l'espace rural. C'est d'ailleurs ce que nous allons faire dans ce qui suit.

Le problème des fertilisants

Les engrais chimiques sont dispersés dans les sols afin d'accroître les rendements des végétaux cultivés. Le principe de leur usage est fondé sur la constatation que l'on emporte avec la récolte une certaine quantité d'éléments nutritifs des plantes : azote, phosphore, potassium et, dans une moindre mesure, soufre, calcium, magnésium et autres oligoéléments. Il faut donc restituer aux sols ces substances sous forme de phosphates, nitrates, sels de potassium, etc., en une quantité équivalente à celle qu'on leur a enlevée avec la récolte.

BCU Lausanne / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Parmi les engrais chimiques les plus utilisés, nous citerons le nitrate d'ammonium, le nitrate de calcium, le sulfate d'ammonium et l'urée (ces derniers sont transformés en nitrates par les bactéries nitrifiantes présentes dans les sols). Le phosphore est surtout dispersé sous forme de superphosphates (orthophosphates solubles). Le chlorure de potassium et, dans une moindre mesure, le nitrate de potassium et la sylvinite [1] constituent les formes usuelles d'apport du potassium. Enfin, dans certains sols acides, il est nécessaire d'effectuer des amendements calciques (chaux ou calcaires broyés, gypse).

(1) Chlorure double de potassium et de sodium.

Dans les conditions actuelles, de grandes quantités de ces fertilisants sont utilisées chaque année en agriculture. La consommation mondiale d'engrais chimiques a été multipliée par 6 entre 1945 et 1965 (Fig. 5.1).

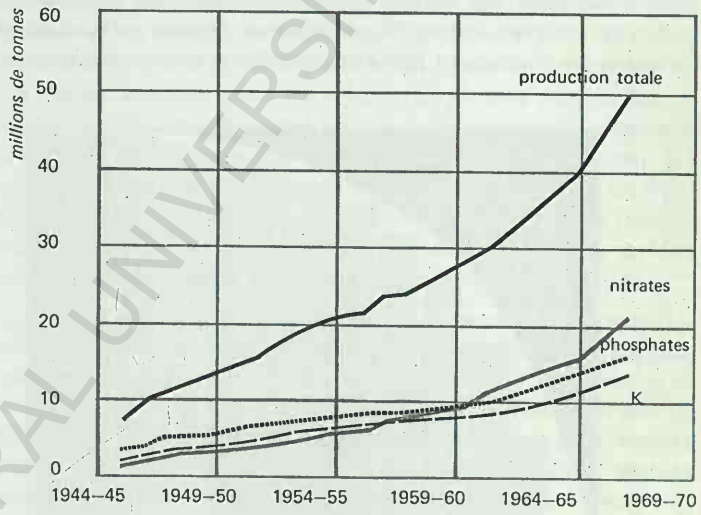


Figure 5.1
Accroissement de la consommation mondiale d'engrais chimiques entre 1945 et 1968 (Chine exclue). Le graphe supérieur correspond à la somme des quantités de divers fertilisants produites. D'après Brown in *Scient. Amer., "the biosphere", sept. 1970, p. 164*

Pour des raisons de prix de revient, ces substances ne sont pas purifiées. Aussi renferment-elles à l'état de traces de nombreux métaux et métalloïdes toxiques et peu mobiles dans les sols. Barrows (1966) signale dans les superphosphates les taux d'impuretés donnés par le tableau ci-contre.

Principales impuretés présentes dans les superphosphates

Arsenic	2,2 à 1,2 ppm
Cadmium	50 à 170 ppm
Chrome	66 à 243 ppm
Cobalt	0 à 9 ppm
Cuivre	4 à 79 ppm
Plomb	7 à 92 ppm
Nickel	7 à 32 ppm
Sélénium	0 à 4,5 ppm
Vanadium	20 à 180 ppm
Zinc	50 à 1 430 ppm

* D'après Barrows (1966).

A ces divers métaux et métalloïdes toxiques apportés par les superphosphates, il faut ajouter des quantités significatives de ces mêmes éléments introduites dans les sols par d'autres fertilisants. Barrows considère que l'ensemble constitue un très sérieux risque potentiel de contamination des terres cultivées. En effet, il s'agit de substances peu mobiles qui s'accumulent dans les horizons superficiels des sols, en particulier dans la couche soumise aux pratiques culturales où sont situées la plupart des racines.

A cet apport de métaux lourds par la fumure, il convient d'ajouter ceux qui résultent des pulvérisations de pesticides : sels de cuivre, arséniate de plomb. Bien que l'usage des insecticides arsenicaux soit réduit de nos jours, l'usage d'herbicides organiques

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

qui renferment de l'arsenic dans leur molécule se développe. Duvigneaud (communication orale) considère, par exemple, que l'usage de ces derniers composés au Vietnam représente une menace potentielle pour les consommateurs des végétaux qui croîtront sur ces sols contaminés. Eu égard aux doses utilisées, l'arsenic demeurera plusieurs décennies dans les horizons superficiels. En effet cet élément, de même d'ailleurs que le plomb, est pratiquement immobile dans le sol et s'accumule dans les dix à vingt premiers centimètres de terre. Keilling (1970) insiste aussi à juste titre sur le sérieux risque de pollution des sols que présente à long terme dans les vignobles l'usage systématique de sels cupriques dans la lutte contre le mildiou de la vigne.

La recherche de rendements maximaux dans les exploitations industrialisées de vaste surface s'effectue entre autres par un surenrichissement des sols en engrais chimiques. Elle constitue de ce fait un nouveau facteur de pollution de l'espace rural, dont les conséquences ne peuvent plus être considérées comme négligeables.

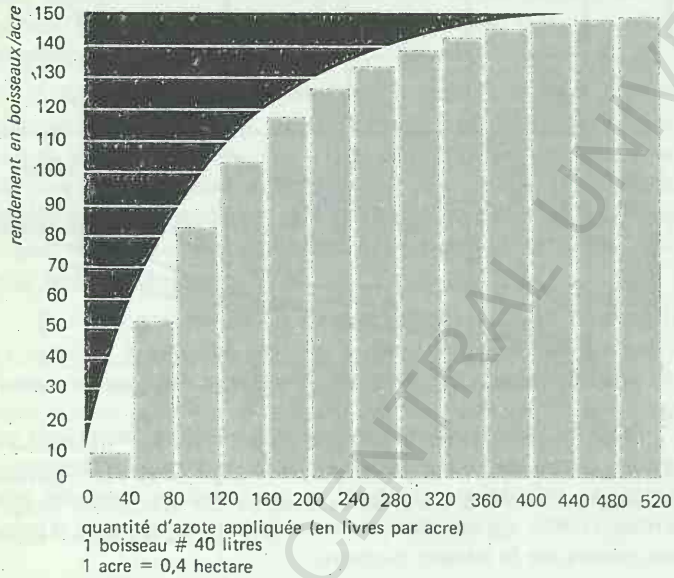


Figure 5.2
Loi des rendements décroissants. Effets de l'application de quantités croissantes de nitrate sur les rendements d'une culture irriguée de maïs dans l'état de Washington. On voit que le gain de rendement tend à décroître au fur et à mesure qu'augmentent les quantités d'engrais introduites. D'après Pratt 1965, in *Scient. Amer., juin 1965*

La loi des rendements décroissants (Fig. 5.2) est, semble-t-il, méconnue de la plupart des exploitants agricoles, mais elle paraît surtout volontairement ignorée par les vendeurs de fertilisants qui "conseillent" l'agriculteur.

Outre la pollution des eaux qui résulte d'un apport excessif de nitrates et de phosphates, ces substances provoquent une contamination des aliments. En effet, les hautes concentrations de fertilisants largement introduites aujourd'hui dans les sols cultivés augmentent le taux de nitrates dans les tissus des végétaux qui croissent sur ces terres surfertilisées. Ainsi, des laitues plantées dans une terre normale titrent 0,1 % d'azote nitrique par rapport à leur

CONCORDIA UNIVERSITY / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

poids sec. Ce taux s'élève à 0,6 % lorsqu'elles sont cultivées dans un sol ayant reçu 600 kg de nitrates par hectare (Commoner, 1970).De même, l'abus d'engrais azotés dans les cultures légumières, comme celles d'épinards, provoque l'apparition de taux excessifs d'azote nitrique dans cette plante, qui semble manifester une propension particulière à accumuler des nitrates dans ses tissus. On a mis en évidence jusqu'à 1,37 g/kg de ces sels dans les épinards aux Etats-Unis et jusqu'à 3,5 g/kg en Allemagne (Schuphan, 1965). Cet auteur conclut que les agriculteurs qui exploitent de grandes surfaces par des méthodes industrielles sont dépourvus de toutes connaissances en matière de fertilisation et aussi que les épinards produits dans de telles conditions présentent de sérieux risques de méthémoglobinémie pour les consommateurs ([1]). En effet, pendant le conditionnement industriel de cette plante (préparation d'aliments pour nourrissons, par exemple), pendant la conservation en réfrigérateur, ou encore par suite de l'action de la flore bactérienne intestinale, les nitrates peuvent être transformés en nitrites très toxiques. Les épinards ainsi préparés ou conservés constituent un réel danger potentiel pour les enfants qui en sont nourris. Des cas de méthémoglobinémie, consécutifs à la consommation d'épinards contaminés par les nitrates en excès dans le sol, ont déjà été signalés en Europe. Mais il y a cependant plus grave : en effet, selon des travaux récents, les nitrites formés dans le tractus intestinal peuvent se transformer en nitrosamines. Or, ces derniers constituent de puissants agents carcinogènes ! (Rondest, 1972).

(1) Causée par l'absorption excessive de nitrates ou de nitrites avec l'alimentation ou l'eau de boisson, la méthémoglobinémie se traduit par la combinaison de l'ion NO_2 avec l'hémoglobine. La méthémoglobine ainsi formée est incapable de retenir l'oxygène de l'air. La dose critique en nitrates dans les végétaux est de 300 ppm.

Mais l'abus d'engrais chimiques ne menace pas seulement la santé humaine, il compromet à long terme la stabilité des agroécosystèmes. Les pratiques actuelles de surfertilisation avec des engrais minéraux, combinés à l'arrêt du recyclage de la matière organique dans les sols cultivés, représentent à long terme une grave menace pour le maintien de la fertilité de ces derniers. Cette menace résulte non seulement de l'accumulation continue des métaux et métalloïdes toxiques renfermés à l'état d'impuretés dans les engrais chimiques mais aussi de modifications physiques de la structure des sols. Commoner (1970) cite des recherches effectuées à la station agronomique du Missouri dès 1950, dans le but de montrer cette action perturbatrice. Celles-ci ont mis en évidence un déclin rapide de la teneur en matières organiques des sols et une dégradation de leur structure physique dans les parcelles expérimentales traitées systématiquement avec des engrais chimiques. La percolation et la rétention de l'eau dans les sols ont été modifiées. *"Un état nouveau s'est apparemment développé, dans lequel les nitrates ne sont pas délivrés à la plante de façon optimale. La plupart de l'azote apporté aux sols est soit dénitrifié, soit entraîné par le lessivage".* Commoner (1972) a fourni une preuve irréfutable qu'une partie importante des nitrates introduits en excès dans les régions de céréaliculture n'est pas retenue par les plantes. Cet auteur s'est fondé sur le fait que l'azote lourd (N^{15}) existe dans les nitrates de synthèse, dans la même proportion isotopique que celle à laquelle il se rencontre dans l'atmosphère. En revanche, le taux

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

d'azote lourd est plus élevé dans les nitrates naturels élaborés par les bactéries nitrifiantes. Les analyses effectuées par Commoner sur des prélèvements d'eaux d'infiltration et de ruissellement ont montré que les nitrates qu'elles renferment sont pauvres en N^{15} et proviennent donc en majorité de l'excès d'engrais azotés apportés aux sols. Commoner conclut qu'au mieux, 80 % des engrais azotés utilisés aux Etats-Unis seraient réellement absorbés par les cultures et que la moyenne nationale serait proche de 50 % ! Comme l'U.S.D.A. (1) prévoit une multiplication par dix de la consommation américaine en fertilisants d'ici l'an 2000, on concevra que les investigations de Commoner n'aient suscité l'enthousiasme ni dans les milieux agronomiques américains préoccupés par la recherche unidimensionnelle des rendements maximaux, ni dans ceux de la puissante association des producteurs de fertilisants U.S. Une violente campagne a été lancée contre cet auteur, cherchant même à lui faire interdire la publication de ses résultats dans les revues de l'A.A.A.S. ! (2)

(1) U.S. Department of Agriculture : ministère fédéral de l'Agriculture aux USA.

(2) A.A.A.S = Association Américaine pour l'Avancement des Sciences.

(3) voir B. Commoner, "L'encerclement", ouvrage cité.

Nous laisserons à Commoner le soin de conclure. Il a écrit dans son dernier ouvrage (3) : *"Cette attitude de la part d'une association dont le but est de promouvoir la commercialisation d'engrais chimiques est compréhensible — surtout lorsqu'il s'agit d'une industrie qui rapporte deux milliards de dollars par an. Toutefois, même dans la communauté scientifique, le concept d'objectivité est contingent. Dans mon cas personnel, par exemple, comme je suis profondément préoccupé par les problèmes d'environnement, je tiens pour préférable une discussion publique allant au fond des choses sur les problèmes de pollution à ma tranquillité d'esprit ou aux profits de l'association des producteurs de fertilisants... Ce n'est pas une position qui peut être soutenue ou critiquée au point de vue scientifique".*

Mais pendant que l'on incorpore au sol des quantités excessives de fertilisants, on a cessé, au nom de la "rentabilité", de retourner aux terres de culture l'humus qui est le garant de leur fertilité. Ceci s'accompagne d'une détérioration de la structure pédologique des sols, par suite du déclin inéluctable du complexe absorbant argilo-humique, lequel a précisément pour rôle de rendre disponible pour les plantes les éléments nutritifs.

Un examen, même superficiel, des pratiques agronomiques actuelles dans les pays industrialisés montre que les matières organiques génératrices d'humus sont aujourd'hui systématiquement emportées hors des agroécosystèmes et détruites. En céréaliculture, on brûle les chaumes au lieu d'enfouir les pailles après la récolte. La spécialisation des entreprises agricoles a rompu l'ancien équilibre agro-sylvo-pastoral. La séparation des productions animales et végétales entrave ou interdit le retour aux sols des fumiers qui s'entassent dans des décharges et polluent les nappes phréatiques après fermentation ammoniacale (Concannon et Genetelli, 1971). Mais il y a plus grave : en effet, les énormes masses de matières organiques fermentescibles constituées par les détritus ménagers des

BOTANISCH CENTRAAL INSTITUUT LIBRARY

grandes villes ne sont plus restituées aux sols. Elles sont entassées sur des surfaces sans cesse accrues que l'on a transformées en décharges publiques, stérilisant du même coup autant de terres de cultures, ou pire encore, sont détruites dans des usines d'incinération, ce qui exclut toute possibilité de récupération ultérieure. Faut-il rappeler que chaque Parisien rejette en moyenne 1 kg/jour d'ordures ménagères, soit une "production" quotidienne de 10 000 tonnes pour la métropole de notre pays ? La solution consistant à brûler ces déchets dans les incinérateurs n'est qu'un pis-aller. Elle revient à substituer à la pollution localisée des sols une contamination plus étendue de l'air. En effet, la combustion des emballages en matières plastiques libère dans l'atmosphère de l'acide chlorhydrique (provenant des chlorures de polyvinyle), et des agents plastifiants, les polychlorobiphényles, nettement plus dangereux pour la santé humaine que le DDT par exemple. La seule solution rationnelle de ce problème est le recyclage. C'est-à-dire la fabrication de composts avec les détritus organiques urbains. En France, diverses collectivités locales, — comme celle d'Annecy, qui adopte une attitude d'avant-garde sur les problèmes d'environnement —, se sont résolument engagées dans la voie du compostage des ordures ménagères. Nous ne méconnaissons pas toutefois l'ampleur des obstacles à vaincre pour systématiser l'usage de cette technique. Celle-ci ne peut donner des résultats satisfaisants qu'à plusieurs conditions.

Elle exige une stricte séparation des déchets solides industriels et domestiques (nous n'en sommes pas là hélas !) et en outre un tri préalable entre les divers résidus ménagers qui permettrait d'isoler les matières organiques fermentescibles (papiers et cartons, détritus végétaux et animaux) des diverses substances toxiques : produits d'entretien, matières plastiques d'usage domestique.

Elle implique donc la mise en œuvre d'un double circuit de récupération des déchets urbains et, en aval, celle de méthodes de distribution efficaces permettant une restitution rapide aux terres de culture des composts produits.

Perturbation des cycles biogéochimiques par l'emploi des fertilisants

PERTURBATION DU CYCLE DE L'AZOTE

Le Cycle de l'Azote est profondément altéré par l'usage des engrais. Malgré les imprécisions qui subsistent encore sur le taux auquel les différentes formes de cet élément circulent dans la biosphère, on peut affirmer que la synthèse industrielle de fertilisants azotés et leur dispersion à la surface des terres émergées a produit une grave perturbation dans son cycle biogéochimique (Cf. Tableau XXXVI A).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XXXVI A — Bilan de la circulation de l'azote dans la biosphère (d'après Delwiche, 1970)

Apports d'azote de l'hydrosphère aux sols	*Quantité en 10^6 t/an*
Fixation biologique	
Fixation par les microorganismes terrestres	14
Fixation par les algues bleues et les bactéries nitrifiantes marines	10
Lessivage des sédiments nitrés	30
Fixation industrielle	30
Fixation atmosphérique	7,6
Volcanisme	0,2
Total	92
Pertes d'azote	
Dénitrification terrestre	43
Dénitrification marine	40
Sédimentation	0,2
Total	83

Delwiche considère que l'ensemble des sources de fixation biologiques, géochimiques (ionisation, volcanisme) et industrielles apporte chaque année 92 millions de tonnes d'azote nitrique à la biosphère. L'industrie des fertilisants, avec une production de 30 millions de tonnes en 1969, occupe donc une place importante par rapport aux processus naturels de nitrification (62 millions de t.). Elle augmenterait de 50 % la quantité totale d'azote circulant dans la biosphère.

Cet accroissement du flux d'azote dû à l'activité humaine constitue un phénomène d'autant plus préoccupant que l'excès de nitrates introduit n'est pas entièrement dénitrifié. Aussi, l'équilibre, qui existait jusqu'à présent dans la biosphère selon les experts, entre nitrification et dénitrification, est aujourd'hui rompu. On relève un excès de nitrates de 9 millions de tonnes par an, qui s'accumule dans l'hydrosphère, par suite du lessivage et du ruissellement à la surface des sols surfertilisés (fig. 5.3). Nous étudierons au chapitre VI les conséquences écologiques de cette rupture du cycle de l'azote car c'est surtout en milieu limnique qu'elles se manifestent avec la plus grande acuité.

PERTURBATION DU CYCLE DU PHOSPHORE

La civilisation moderne a considérablement accru le taux naturel de phosphates circulant entre la lithosphère, les sols et l'hydrosphère (fig. 5.4). Le tableau XXXVI B figure les principaux éléments du cycle du phosphore.

Il apparaît que les 10,2 millions de tonnes extraites des roches phosphatées de la lithosphère en 1968 pour en faire des engrais chimiques représentent près des trois quarts de la quantité de cet élément amenée chaque année des sols à l'hydrosphère par les eaux continentales.

LAVAL UNIVERSITY LIBRARY

Figure 5.3
Estimation quantitative des principaux paramètres du cycle de l'azote et de sa perturbation par la synthèse industrielle d'engrais nitrés. Explications dans le texte. D'après Delwich in *Scient. Amer., "the biosphere", septembre 1970, p. 140*

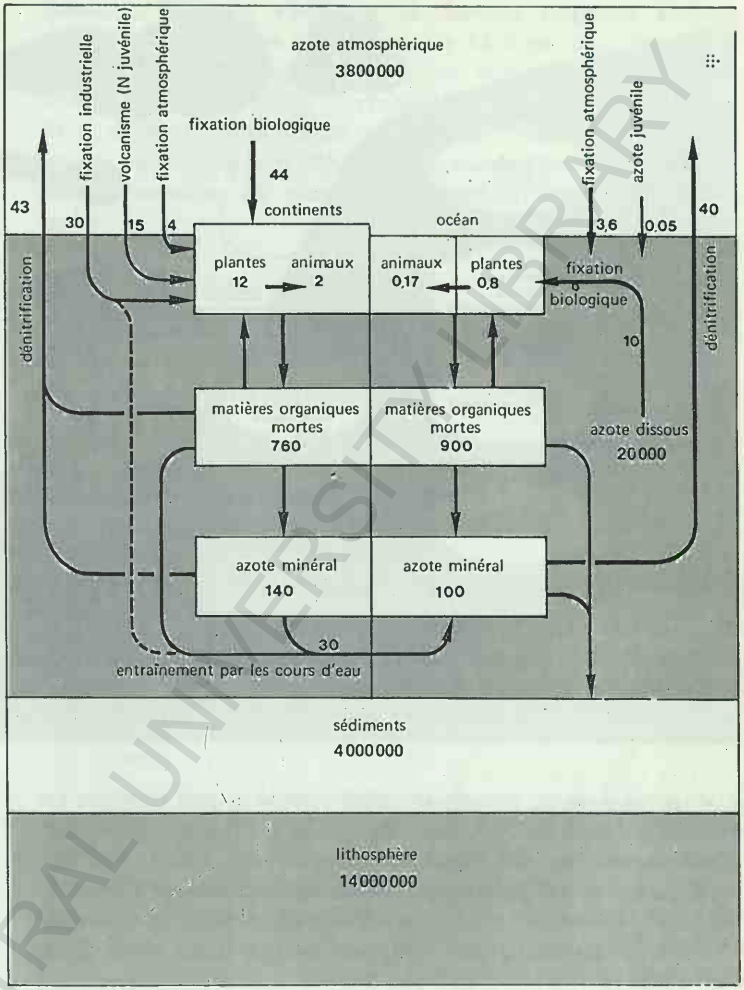


Tableau XXXVI B — Principaux éléments du cycle biogéochimique du phosphore

	en millions de tonnes
Apport annuel des continents aux océans	14
Sédimentation en milieu océanique	13
Absorption phytoplanctonique	1 300
Quantité dissoute dans les mers	120 000
Apports aux sols par les engrais chimiques	10,2
Retour aux continents (Guano et résidus des pêcheries)	0,1

* d'après divers auteurs dans *"Man in the living environment"* University of Wisconsin Press, 1972, p. 52

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

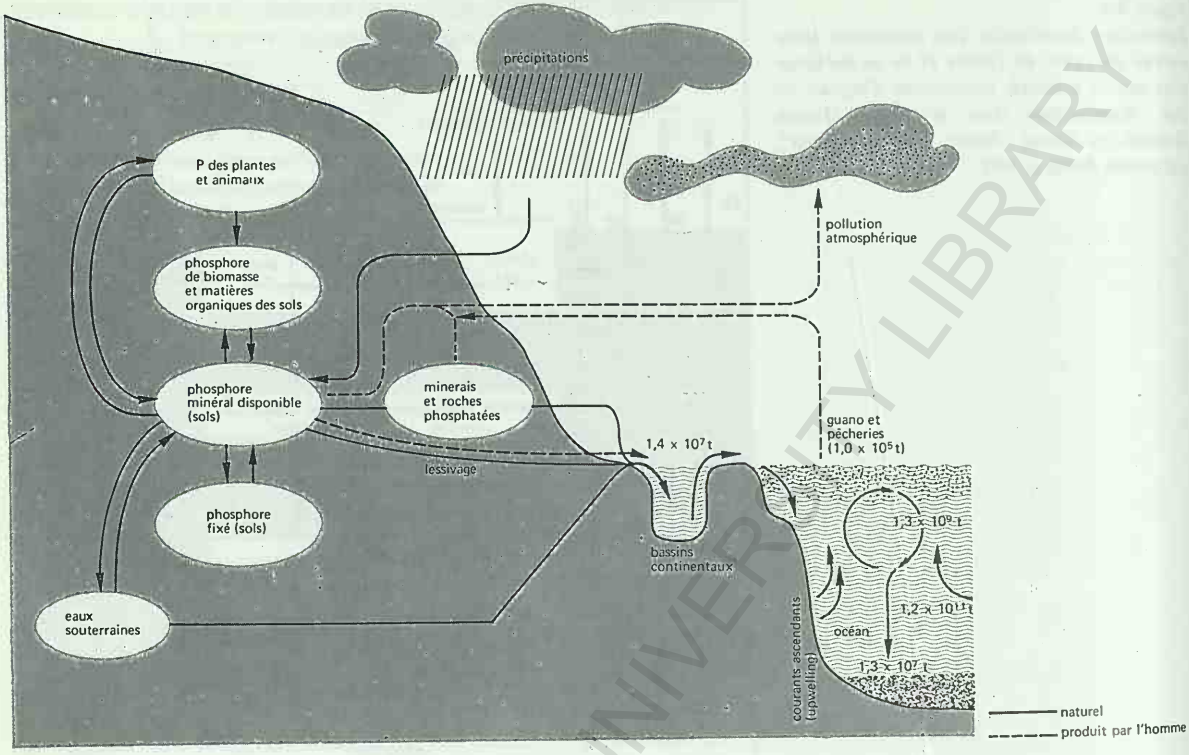


Figure 5.4
Interférence de l'industrie des engrais avec le cycle du phosphore. Explications dans le texte. D'après F. Smith et al., 1972, in *"Man in the living environment", University of Wisconsin Press, 1972, p. 49*

La majorité du phosphore utilisé comme engrais chimique est immobilisée dans les sols à cause de leur richesse en calcium, aluminium et fer qui fixent cet élément (Cf. chap. I, p. 61). Cependant une partie de cet excès de phosphore est entraînée dans les eaux continentales où il joue un rôle déterminant dans l'induction des phénomènes d'eutrophisation. (Voir chapitre VI, p. 332).

La pollution des sols par les pesticides et ses conséquences écologiques

La dispersion systématique de quantités sans cesse accrues de pesticides dans l'espace rural nous offre, mieux qu'aucun autre type de pollution, une remarquable illustration des catastrophes écologiques auxquelles peut conduire l'usage irréfléchi d'une nouvelle technologie. Parmi les diverses causes de contamination de l'environnement, les pesticides occupent en effet, à bien des égards, une place prééminente et singulière. A la différence de tous les autres polluants, les pesticides sont dispersés volontairement dans le milieu naturel, afin de détruire certains parasites des animaux domestiques ou de l'homme, ou dans l'espace rural pour détruire divers ravageurs des cultures [1].

Les surfaces traitées sont très considérables. Elles sont évaluées à 5 % au moins de la surface du territoire national aux

(1) On dénomme traitement *phytosanitaire* le fait d'utiliser des pesticides pour protéger les végétaux des attaques des ravageurs. Bien qu'il soit passé dans l'usage courant, ce terme est impropre. On ne saurait prétendre que les mauvaises herbes soient une maladie pour les cultures de plantes sarclées. De même, des insectes comme le carpocapse des pommes, la mouche des cerises ou les tordeuses de la grappe ne sont pas physiologiquement nuisibles à ces plantes dont elles attaquent les fruits par la pulpe.

ROUSSEAU CENTENNIAL UNIVERSITY LIBRARY

Etats-Unis (Newsom, 1967), où la quantité totale de matières actives utilisées à cette fin s'accroît de 15 % par an ! En France, on évalue à 18 millions d'hectares au minimum la surface exposée à une intervention phyto-sanitaire au moins par an, soit 39 % de la superficie totale du territoire métropolitain. Aucun service du ministère de l'Agriculture ou de l'Environnement ne semble connaître les quantités de produits employées à cette fin [1].

(1) Toutes les demandes écrites ou orales de statistiques relatives à ces problèmes que nous avons faites aux personnes compétentes ont reçu une réponse négative.

NATURE DES PESTICIDES

Les pesticides modernes sont pour la plupart des substances organiques de synthèse. Leur nom provient du terme anglais *pest* qui signifie déprédateur, ravageur.

On distingue parmi eux :

— des insecticides, destinés à détruire les insectes nuisibles,

— des fongicides, qui servent à lutter contre les champignons phytopathogènes,

— des herbicides qui permettent d'éliminer les mauvaises herbes adventices des cultures,

— des rodenticides, employés contre les rongeurs,

— des nématocides toxiques pour les vers du groupe des nématodes,

— etc.

L'usage de ces divers composés s'est vulgarisé à la fin de la seconde guerre mondiale. Dès 1939, deux puissants insecticides, le DDT et l'HCH (dont le principe actif est le lindane) furent découverts en Europe occidentale. Cependant, la vulgarisation du DDT fut le fait de l'armée américaine, après l'acquisition du brevet de la firme Geigy par les Etats-Unis. Le premier succès de cette substance fut retentissant. Ainsi que l'écrit R. Dajoz (1969) : *"elle permit en plein hiver 1944, en pleine guerre, d'enrayer une épidémie de typhus qui affectait déjà 1 400 personnes et en menaçait 2 500 000 dans la région de Naples"*, fait unique dans les annales épidémiologiques. Son utilisation sous forme de poudre permit aux services médicaux des armées alliées de réaliser un épouillage systématique des populations. Le cas du DDT est cependant éloquent. N'est-il pas significatif qu'après trente années d'usage intensif de cet insecticide, la Suisse, pays où il fut découvert et la Suède, qui décerna le prix Nobel à son inventeur P. Muller, aient décidé d'en interdire l'emploi ?

Le nombre de pesticides s'est accru de façon très considérable, au cours des dernières décennies. En France, plus de 300 composés organiques de synthèse sont aujourd'hui homologués à des fins phytosanitaires. Ce chiffre s'élève à 900 aux Etats-Unis où de tels produits sont vendus sous 60 000 préparations commerciales différentes.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les insecticides se répartissent en trois groupes principaux : les substances minérales, les insecticides d'origine végétale, enfin les produits organiques de synthèse, qui sont aujourd'hui de fort loin les plus utilisés. On fait remonter au Moyen Age les premières tentatives de lutte chimique contre les fourmis à l'aide de sels d'arsenic et dès 1690, un horticulteur français songea à faire appel à une décoction de tabac pour tuer une punaise — *Stephanitis pyri* — nuisible au poirier. Cependant, la véritable histoire de la lutte chimique contre les insectes nuisibles ne commence qu'au milieu du XIX^{e} siècle, lorsque les agriculteurs américains eurent à affronter la catastrophique invasion du doryphore et prirent la décision sans précédent pour traiter les cultures de pommes de terre destinées à l'alimentation humaine d'utiliser des arsenicaux. Jusqu'à la veille de la deuxième guerre mondiale, ceux-ci constituaient avec quelques substances végétales : nicotine, pyrèthre, et roténone, les seuls insecticides dont on disposait.

La découverte des insecticides organiques de synthèse apporta, il faut bien le dire, une solution radicale tout au moins dans l'immédiat, à bien des problèmes de protection des végétaux et d'entomologie médicale.

Tableau XXXVII — Accroissement des rendements consécutifs à l'usage des Pesticides (d'après Rudd, 1966)

Culture	*"Ravageurs"*	*Rendements Culture non traitée*	*Rendements par acre Culture traitée*	*Coût du traitement*	*Gain net par acre (en dollars)*
Orge	Mauvaises herbes	16 q	17,4 q		5
Graine de coton	Chenille des capsules	31,4 q	35,4 q	16	126,5
Semences de pois	Champignons	2,05q	2,77q	0,7	21,5
Tomates	Maladies	5,4 q	11,8 q	40	100
Betteraves	Pegomyie	11,8 t	14,5 t	2,25	32,20

Le tableau XXXVII montre qu'en bien des circonstances, les gains de rendements obtenus par l'usage des produits phytosanitaires ne sont pas négligeables. Dans quelques cas, l'accroissement de productivité qu'ils permettent est encore plus élevé. Ainsi, les rendements de la pomme de terre ont été accrus de 50 % aux Etats-Unis grâce à l'usage des insecticides organo-chlorés. La découverte des esters phosphoriques a permis dans ce même pays de sauver de l'anéantissement les cultures de luzerne, qui étaient menacées d'extinction par un puceron *(Terioaphis maculata)* accidentellement introduit dans la moitié occidentale de ce pays. Les criquets migrateurs, — un des fléaux de l'Egypte selon la Bible —, sont aujourd'hui efficacement contrôlés en bien des régions, par surveillance des aires grégarigènes et traitement par avion de ces dernières lorsque la densité en criquets y excède un seuil critique.

MCGILL CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les insecticides de synthèse actuels se répartissent en trois groupes principaux : les organo-chlorés, les esters phosphoriques et les carbamates. Ils ont tous la propriété d'être toxiques par contact, c'est-à-dire de provoquer un empoisonnement rapide des insectes, car ils traversent leur tégument cuticulaire avec la plus grande facilité. Ils agissent aussi par ingestion lorsque l'insecte se nourrit des parties aériennes d'un végétal traité. Certains possèdent de plus une tension de vapeur assez forte pour tuer les insectes par inhalation (lindane ou DDVP par exemple). Enfin, certains insecticides, dits systémiques, possèdent la propriété de passer dans la sève par voie transfoliaire ou radiculaire et de la rendre toxique pour les arthropodes piqueurs (pucerons, cochenilles et acariens) qui s'en nourrissent. Ce sont surtout des esters phosphoriques, bien que le lindane et certains carbamates présentent aussi à des degrés divers cette faculté.

Les *insecticides organochlorés* sont préparés par chloration d'hydrocarbures aromatiques ou hétérocycliques (terpénes, p.e.). Nous citerons dans ce groupe : le DDT, divers dérivés chlorés des cyclodiènes (aldrine, dieldrine, endrine, heptachlore, etc.) et le lindane qui est un des nombreux isomères de l'hexachlorocyclohexane (le γ-HCH). A peu près insolubles dans l'eau, ce sont des composés très stables qui peuvent demeurer des années, voire des décennies dans les sols sans se décomposer !

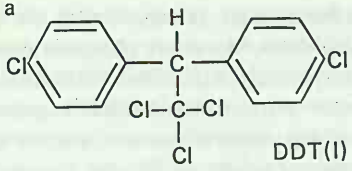
Les *organophosphates* sont des esters de divers alcools avec l'acide orthophosphorique ou d'un de ses dérivés, l'acide thiophosphorique. Tel est le cas du parathion (thiophosphate de diéthyle et paranitrophényle) qui figure parmi les composés de ce groupe les plus connus et les plus utilisés. Il fut synthétisé en 1944 par l'Allemand Schrader, lequel obtint le prix Nobel de chimie pour sa découverte des insecticides organophosphorés. C'est dans cette famille chimique que l'on rencontre les meilleurs insecticides connus actuellement. O'Brien (1967) fait remarquer à juste titre que ces substances représentent un des rares cas dans l'histoire de la technologie où *"une épée a été transformée en soc de charrue"*. En effet, ces composés sont voisins de puissants gaz de combats doués de propriétés anticholinestérasiques et furent initialement découverts, plus ou moins fortuitement, dans des laboratoires de recherches sur l'arme chimique.

Les esters phosphoriques présentent une certaine sélectivité dans leur toxicité pour les insectes à la différence des organochlorés dont le spectre d'action est des plus vastes. En outre, la plupart d'entre eux sont rapidement biodégradables aussi bien dans le sol que dans les eaux. Nous citerons parmi les innombrables substances de ce groupe (plus de 50 000 espèces chimiques ont été synthétisées et plusieurs centaines commercialisées comme insecticides), le malathion (Fig. 5.5 c), le trichlorfon, le DDVP (1), la phosalone, le dursban, le ronnel, le fenthion, le diazinon, etc, etc. Certains d'entre eux comme le déméton, le phosdrin ou l'endothion sont doués de propriétés systémiques.

(1) Cet insecticide sert à fabriquer les plaquettes que l'on suspend dans les habitations pour tuer les mouches, les moustiques et autres espèces d'insectes anthropophiles.

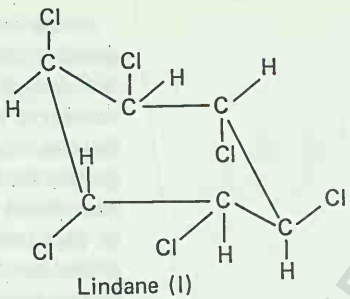
BDU IASI / CENTRUL DE DOCUMENTARE

a



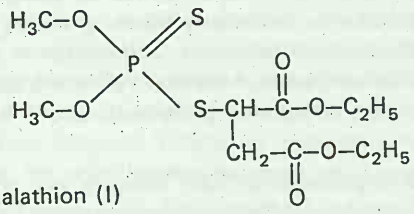
DDT(I)

b



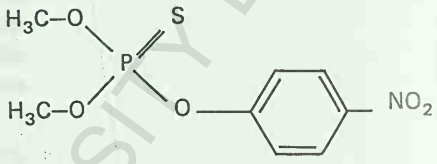
Lindane (I)

c



Malathion (I)

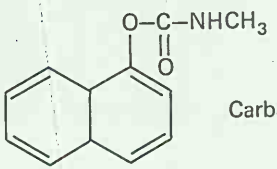
d



Méthyl-Parathion (I)

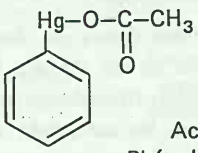
e $CH_3-O-(CH_2)_2-Hg^+$
Méthoxyéthyl Mercure (F)

f



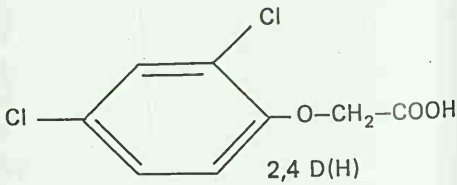
Carbaryl (I)

g



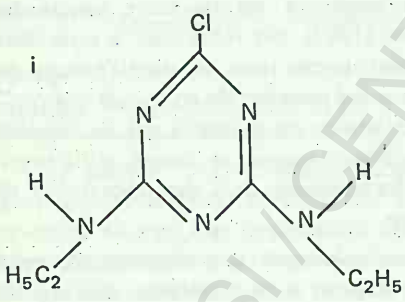
Acétate de
Phényl Mercure (F)

h



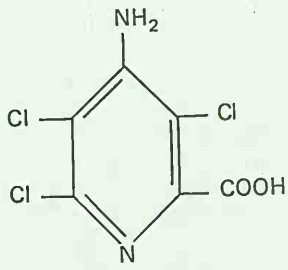
2,4 D(H)

i



Simazine (H)

j



Pichloram (H)

Figure 5.5
Formules chimiques de quelques pesticides d'usage courant (I = insecticide, F = fongicide, H = herbicide)

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les *carbamates* insecticides sont pour la plupart des esters de l'acide N-méthylcarbamique. Le carbaryl ou sevin (Fig. 5.5 f) possède une activité intéressante contre les coléoptères et les chenilles défoliatrices ainsi qu'une faible toxicité pour les vertébrés à sang chaud.

Les fongicides permettent de lutter contre les maladies cryptogamiques qui causent de graves dommages aux végétaux cultivés. Le mildiou de la pomme de terre, celui de la vigne, les charbons et les rouilles des céréales, représentaient autrefois de véritables fléaux. Ces affections sont provoquées par l'invasion des divers tissus des plantes par le mycelium de champignons microscopiques.

La lutte contre ces maladies, essentiellement préventive, consiste à disperser sur les feuilles des fongicides qui tuent le germe mycelium très fragile au moment de la germination des spores.

Les plus anciens fongicides connus sont divers sels cupriques, le soufre et certains de ses dérivés minéraux. Ils sont de plus en plus concurrencés par divers composés organiques.

A la fin des années 30 s'est répandu l'usage des fongicides organomercuriels. Combinés à un insecticide organochloré, ils servent de nos jours à l'enrobage des semences. Cette technique a pour but de protéger la jeune plantule contre les attaques de divers ravageurs : insectes terricoles, champignons agents de la fonte des semis ou des charbons des céréales, des fusarioses, helminthosporioses, etc.

Au chlorure de méthylmercure, extrêmement toxique pour les animaux ont été substitués les silicates de méthoxyméthyl et éthylmercure (Fig. 5.5 e) et l'acétate de phénylmercure.

Les herbicides de synthèse ont aussi connu un extraordinaire essor au cours des quinze dernières années et présentent aujourd'hui la plus forte croissance parmi les diverses productions de l'industrie des pesticides.

Le chlorate de soude et divers dérivés arsenicaux ont été employés de longue date comme désherbants des allées mais leur emploi était limité à cet usage, car les surfaces ainsi traitées ne peuvent supporter aucune plante pendant de nombreuses années. C'est en France que les propriétés herbicides des dinitrocrésols furent pour la première fois utilisées en 1934 dans les cultures de céréales.

Aujourd'hui, il existe de très nombreuses substances organiques de synthèse possédant de telles propriétés.

Les dérivés de l'acide phénoxyacétique furent les premiers composés de ce groupe à être commercialisés. Ils furent utilisés dès la fin de la seconde guerre mondiale dans le désherbage des cultures céréalières. Ces substances miment l'action des auxines végétales et produisent des désordres de la croissance chez les dicotylédones. Elles pénètrent dans la plante par contact et diffusent à l'intérieur des tissus. Elles atteignent de la sorte les zones

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

méristématiques dans lesquelles elles induisent des troubles physiologiques fatals aux plantes traitées. Le 2,4 D et le 2,4,5 T (fig. 5.5 h) représentent aujourd'hui encore les herbicides les plus utilisés dans les cultures. Leur usage comme défoliants [1] au Vietnam par l'armée américaine s'est traduit par des effets catastrophiques sur la faune, la flore et les populations contaminées (Orians et Pfeiffer, 1970, Dang Tam, 1970).

(1) Le 2,4,5 T représente à lui seul 70 % de la masse totale d'herbicide utilisée au Vietnam.

Les triazines comme la simazine (fig. 5.5 i) ou l'aminotriazole sont de plus en plus utilisées dans le désherbage du maïs et d'autres cultures. Les herbicides de ce groupe agissent non pas par contact foliaire comme les précédents mais par absorption radiculaire. Ils inhibent la photosynthèse par blocage du cycle de Calvin de sorte que la plante intoxiquée est incapable de fixer le gaz CO_2.

Les urées substituées (monuron, diuron, linuron) constituent un autre groupe d'herbicides assez solubles dans l'eau et relativement persistants dans les sols. Outre leur pouvoir herbicide intense sur les phanérogames, elles présentent une toxicité extraordinaire pour le phytoplancton à des doses aussi faibles que 0,1 ppb (Ukeles, 1961). Les bipyridilium (Diquat et Paraquat) sont des herbicides de contact qui détruisent rapidement les méristèmes par application foliaire.

Le pichloram a aussi été largement employé par les Etats-Unis au Vietnam. Cette pyridine chlorée (fig. 5.5 j) constitue le plus puissant et le plus persistant de tous les herbicides connus. Certaines espèces végétales lui sont si sensibles qu'il peut les éliminer entièrement à des doses aussi faibles que 60 g à l'hectare ! Il aurait été utilisé au Vietnam à raison de 1,7 kg/ha (Orians et Pfeiffer, 1970) !

Les sols ainsi contaminés seront incapables de porter la moindre végétation pendant des années et risquent d'être à jamais ruinés par suite de leur sensibilité à l'érosion. La rémanence et la stabilité du pichloram sont d'ailleurs vraiment étonnantes. Ainsi, la présence de traces de cet herbicide dans le fourrage donné en nourriture à des mulets a suffit pour empêcher pendant plusieurs mois la croissance de toute végétation sur un sol auquel on avait incorporé le fumier produit par ces animaux (Cole, 1970) !

L'expansion de la production mondiale de pesticides s'effectue depuis plus de 25 ans sans aucun fléchissement ; malgré l'absence de statistiques précises dans de nombreux pays, dont la France, sur ce type d'activité industrielle, on peut imaginer l'importance de la production actuelle en prenant en considération celle des Etats-Unis. Celle-ci dépassait les 500 000 tonnes de matières actives en 1970, ce qui représente une masse énorme, eu égard à l'extraordinaire activité biocide de la plupart de ces substances.

Toutefois, l'importance relative de certains pesticides tend aujourd'hui à s'accroître aux dépens d'autres composés du même groupe [1].

(1) Il existe de grandes différences dans la quantité de chaque composé réellement utilisé. Ainsi, 12 insecticides et 12 herbicides représentaient en 1964 les 85 % de la consommation totale de ces substances aux Etats-Unis. Le DDT et le toxaphène correspondaient à eux seuls à 46 % de la quantité totale d'insecticides utilisés dans ce même pays.

BOURNEMOUTH UNIVERSITY LIBRARY

Ainsi, bien que les insecticides constituent la catégorie prépondérante en masse de substances produites, on constate que l'usage des herbicides présente actuellement une vitesse de croissance double de celle des autres produits "phytosanitaires". Par ailleurs, la baisse de production du DDT, consécutive à l'interdiction de son emploi dans la plupart des pays industrialisés, a été compensée par l'accroissement des autres organochlorés. Enfin, la part relative des esters phosphoriques et des carbamates tend à s'accroître par rapport à celle des autres insecticides (fig. 5.6).

On pourrait s'interroger sur les causes du succès extraordinaire qu'à connu l'usage des pesticides. Outre l'augmentation importante des rendements agricoles ([1]), précédemment évoquée, ils ont diminué dans une proportion notable la part de main-d'œuvre nécessaire en agriculture. On a pu calculer qu'un seul travailleur employé dans l'industrie à produire des herbicides remplace cent personnes occupées au sarclage manuel des cultures. Un exploitant agricole américain produisait en 1940 les quantités de nourriture et de fibres textiles nécessaires à 10 personnes ; en 1960, ce même agriculteur subvenait aux besoins de 25 personnes (Metcalf, 1965).

(1) Une critique doit cependant être faite à ce genre d'argumentation. Il est certain que les partisans de la lutte chimique à outrance manifestent une forte propension à attribuer aux seuls pesticides l'accroissement des rendements observés en agriculture depuis 1945. Il nous semble fort contestable "d'omettre" de la sorte le rôle joué par l'extension de l'irrigation des cultures, de la fumure minérale et par la découverte de nouvelles variétés plus productives (maïs hybrides, par exemple) dans les progrès accomplis depuis cette date par la productivité agricole !

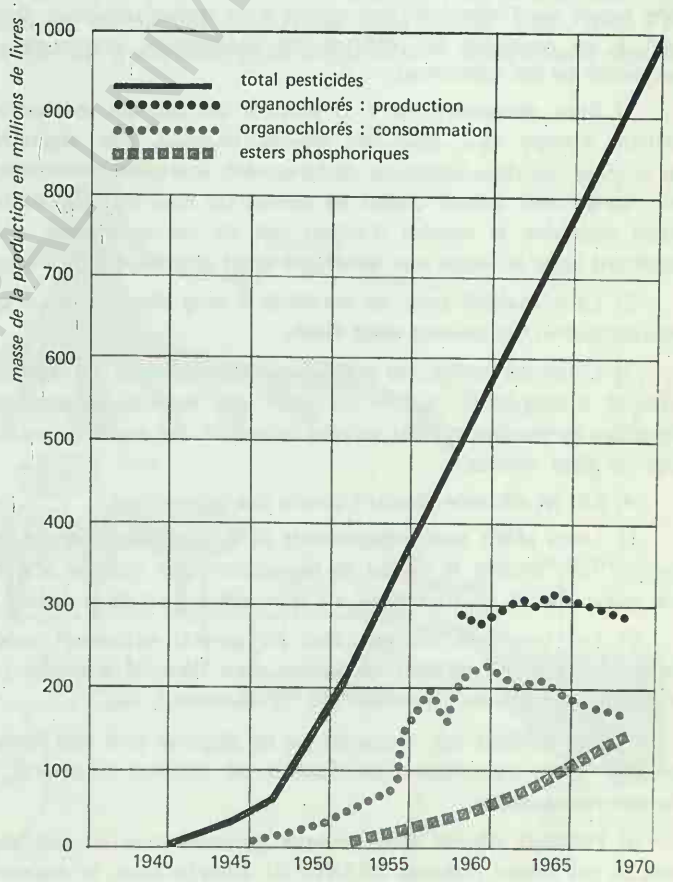


Figure 5.6
Accroissement de la production américaine de pesticides entre 1940 et 1969. D'après USDA in Ramade, Rev. Inf. CFP, 1969, n° 38, p. 28

EDU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Malheureusement, malgré tous les avantages inhérents à l'emploi des pesticides, un certain nombre d'inconvénients apparurent peu à peu, dont certains se révèlent aujourd'hui beaucoup plus graves que l'on ne l'avait initialement supposé. Tous résultent de leurs particularités toxicologiques, mais les plus lourdes conséquences sont du domaine de l'écologie.

Moore (1967) résume très bien le problème dans les deux formules suivantes :

Pesticide ⟶ ravageur ± quelques "effets secondaires" (1)

Pesticide ⟶ ensemble de l'écosystème (2)

où le symbole ⟶ signifie "agit sur".

En effet, cet auteur insiste sur le fait que le concept initial de l'action des pesticides — formule (1) — est entièrement erroné.

En réalité, un pesticide quel qu'il soit, provoque inéluctablement de profondes modifications dans l'ensemble de l'écosystème dans lequel on l'introduit. Son action n'est jamais univoque. Cela tient à un ensemble de particularités écologiques, communes à l'ensemble de ces substances.

1) Elles présentent dans la plupart des cas un spectre de toxicité étendu tant pour les espèces animales que végétales. De la sorte, les dénominations de fongicides, acaricides, herbicides, etc., constituent autant d'abus de termes car elles restreignent de façon excessive le spectre d'action réel de ces substances, leur conférant dans la lettre une spécificité dont elles sont dépourvues.

2) Leur toxicité pour les vertébrés à sang chaud et pour les poïkilothermes est souvent assez élevée.

3) L'homme utilise ces substances pour détruire un nombre restreint d'organismes ; 0,5 % du total des espèces peuplant la biosphère au maximum *alors qu'elles agissent* à des degrés divers *sur tous les êtres vivants.*

4) On les emploie toujours contre des populations.

5) Leurs effets sont indépendants de la densité mais on ne les emploie que lorsque le niveau de population d'un nuisible atteint une valeur élevée (le traitement est donc dépendant de la densité).

6) Les quantités utilisées sont en général nettement supérieures à celles qui seraient nécessaires pour détruire le ravageur : surcharges volontaires, traitement dit "d'assurance", etc.

7) Les surfaces sur lesquelles on les disperse sont très considérables. Elles s'expriment en dizaines de millions d'hectares à l'échelle européenne.

8) Plusieurs d'entre elles peuvent persister dans les sols des mois ou des années (Tableau XXXVIII A). Dans les eaux, on évalue à

Tableau XXXVIII A — Persistance des insecticides organochlorés dans les sols (*)

Insecticide	*% persistant après 14 ans*
Aldrine	40
Chlordane	40
Endrine	41
Heptachlore	16
HCH	10
Toxaphène	45
	après 15 ans (autre échantillon)
Aldrine	28
Dieldrine	31
	après 17 ans
DDT	39

* D'après Nash et Woolson, 1967.

PUNJAB AGRICULTURAL UNIVERSITY LIBRARY

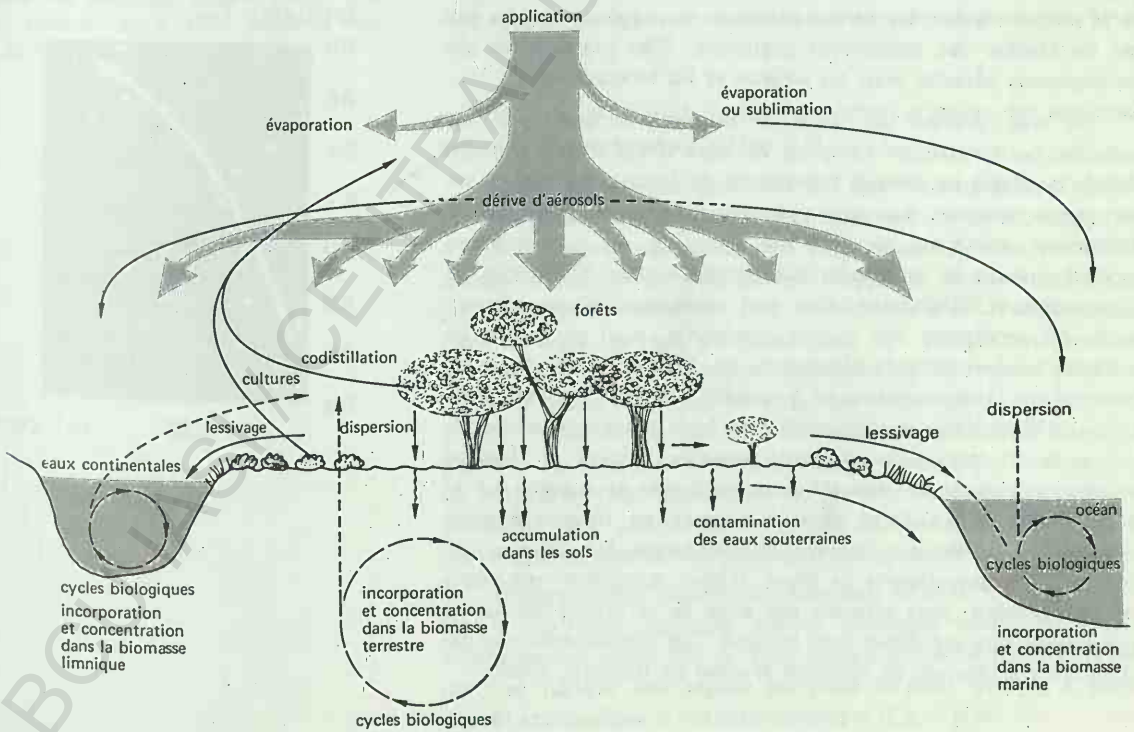
une dizaine d'années la durée de demi-vie du DDT, à plus de 20 ans celle de la dieldrine. Le 2,4 D, le pichloram et d'autres herbicides possèdent aussi une forte persistance en milieu aquatique. Des accidents se sont produits avec les dérivés de l'acide phénoxyacétique plusieurs années après la contamination de nappes phréatiques servant à l'irrigation des cultures (d'après Westlake et Gunther, 1966).

La stabilité des pesticides présente pour corollaire diverses conséquences qui aggravent les problèmes inhérents à ce type de pollution.

La dispersion des pesticides s'effectue bien au-delà des agro-écosystèmes dans lesquels ils sont utilisés.

On a pu montrer que même pour les moins volatils d'entre eux, plus de 50 % des matières actives passent directement dans l'atmosphère au moment du traitement. Dans le cas de la dieldrine ou du DDT, dont la tension de vapeur est cependant faible, il se produit un phénomène de codistillation avec la vapeur d'eau à la surface du sol (Bowman et coll, 1965). Cette fraction de la masse totale dispersée qui n'atteint pas la culture, dérive, est entraînée par le vent et va se déposer sur d'autres sols ou dans les océans, en des lieux parfois très éloignés des zones traitées. Ainsi, Oden a pu déceler des traces assez importantes de DDT et de lindane dans des

Figure 5.7
Cinétique des pesticides dans la biosphère. Une proportion importante du produit n'atteint pas la zone traitée, dérive et se dépose dans des écosystèmes plus ou moins éloignés. Une fraction se sublime dans l'air et fait l'objet d'un transport dans les zones océaniques les plus reculées. En milieu continental, se produit aussi une incorporation à la biomasse terrestre ou limnique. D'après Rudd, 1971, mais modifié

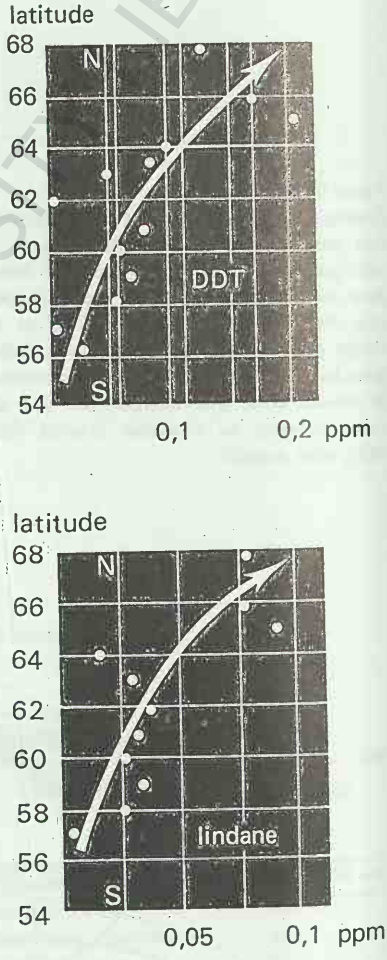


BOURNEMOUTH CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

prélèvements de sol effectués en 500 localités de Suède *qui n'avaient jamais été exposées* à des traitements insecticides. Les taux de résidus étaient d'autant plus élevés que les échantillons provenaient de régions plus septentrionales (fig. 5.8). Rizebrough, Huggett et coll., (1968) ont décelé 41 ppb de DDT dans des aérosols retombant sur les îles Barbades. Ces derniers provenaient de particules de sols entraînées par l'érosion éolienne à partir de régions du Maroc où avaient été réalisés des traitements contre les criquets migrateurs. Cet insecticide avait donc accompli un trajet de plus de 4 000 km au-dessus de l'Atlantique avant de retomber à la surface de ces îles.

La contamination des sols par les pesticides est donc aujourd'hui un phénomène quasi universel, tout au moins avec les insecticides organochlorés. C'est évidemment dans les terres cultivées que l'on rencontre les concentrations les plus fortes. Hascoet (1968) a pu mettre en évidence une sérieuse contamination des sols cultivés français par les insecticides organochlorés. L'étude systématique d'un grand nombre de sols exposés à des traitements insecticides aux doses usuellement recommandées a montré qu'ils renfermaient entre 0,12 à 1,22 ppm de dieldrine et d'aldrine (Decker, Bruce et Bigger, 1965).

Figure 5.8
Accumulation de DDT et de lindane en fonction de la latitude dans des sols suédois n'ayant jamais été traités par ces insecticides. D'après Oden in *Lundholm, Singer "Global effects of environmental pollution", Reidel ed. 1970, p. 201*



EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LES ESPECES ET LES BIOCŒNOSES

La pollution des milieux continentaux par les pesticides va se traduire par diverses perturbations écologiques. Celles-ci résultent de la contamination des parties aériennes des végétaux et des sols par les résidus des traitements pesticides. Elles présenteront des conséquences néfastes pour les espèces et les biocœnoses.

On met souvent en cause le manque de sélectivité des pesticides pour expliquer l'ampleur de leurs effets écologiques. En réalité, bien que ce facteur intervienne de façon significative, on peut aussi montrer que même un composé doué d'une action strictement spécifique sur une seule espèce de la biocœnose pourrait induire de profondes modifications dans l'ensemble de l'écosystème. L'élimination d'un seul composant d'une communauté, s'il représente une espèce dominante, peut provoquer de véritables bouleversements biocœnotiques. Dans un autre domaine, l'exemple de la myxomatose en a apporté une excellente démonstration. L'éradication quasi complète du lapin *(Oryctolagus cuniculus)* après l'introduction de cette maladie à virus en Europe occidentale a présenté une influence profonde et durable sur le couvert végétal. La forêt s'est développée en diverses régions couvertes de landes que l'on croyait spontanées (en Sologne par exemple). Les populations de lièvre *(Lepus europeus)* ont accru considérablement leurs effectifs par suite de la diminution de la concurrence interspécifique avec le lapin. Des phénomènes comparables ont été observés en Australie (Fenner et Ratcliffe, 1965).

BUSSIGENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

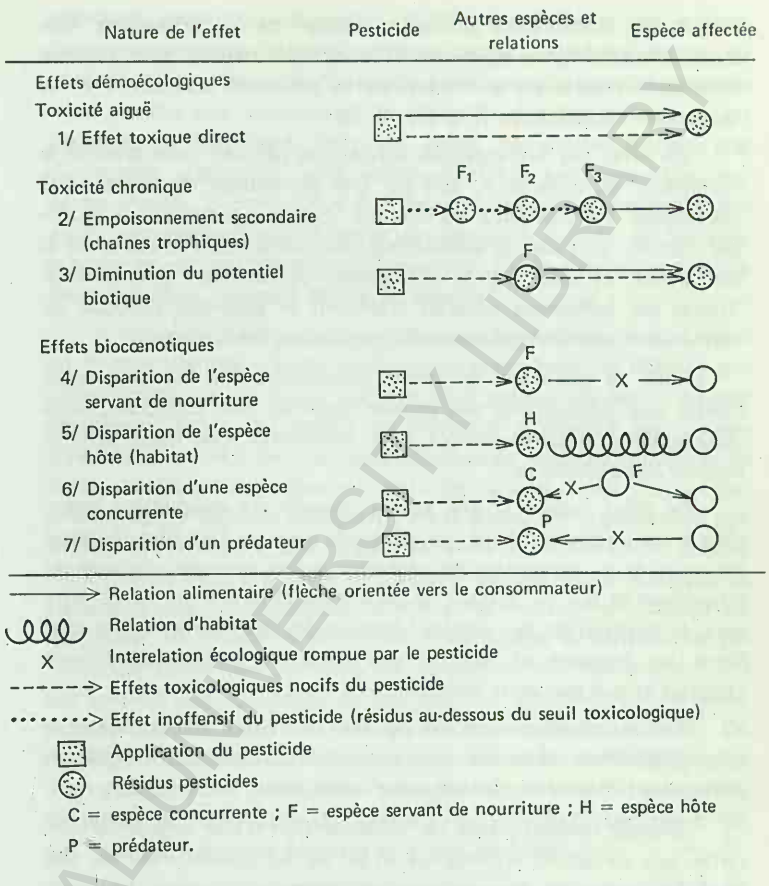


Figure 5.9
Schéma des principales modalités d'action écologique des pesticides. D'après Moore, Adv. Ecol. Research, vol. 4, 1967, Pergamon Press ed., p. 75

On peut distinguer plusieurs modalités d'action des pesticides au point de vue écologique (Fig. 5,9).

Une première catégorie d'effets, que nous qualifions de *démoécologiques,* se traduisent par un ensemble d'influences pertubatrices s'exerçant au niveau des populations de chaque espèce sensible à l'action de telle ou telle substance phytosanitaire. Les conséquences de ces effets sont immédiates. Elles résultent de la toxicité aiguë de ces composés pour les espèces animales ou végétales considérées. Elles se traduisent par la mortalité d'une certaine proportion des effectifs des populations contaminées, d'autant plus élevée que la dose appliquée sera plus forte. Le pesticide se comporte comme un facteur écologique indépendant de la densité. Quels que soient les effectifs occupant un territoire déterminé, une concentration donnée du pesticide provoquera le même pourcentage de mortalité dans la population.

D'autres effets démoécologiques sont différés. C'est par exemple le cas d'un pesticide qui se concentre dans une chaîne trophique (cf. chap. III, p. 183) jusqu'à atteindre dans les proies dont se nourrit une espèce carnivore le seuil critique à partir duquel se manifeste la toxicité chronique (Fig. 5.9, n° 2).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Outre la mortalité qui peut résulter de ce phénomène, une autre influence plus insidieuse et tout aussi néfaste pour l'espèce considérée résulte en la diminution du potentiel biotique, à cause de l'action du pesticide (Fig. 5.9 n° 3).

En effet, les intoxications chroniques peuvent aussi affecter le coefficient de natalité *b,* soit par une diminution de la fécondité intrinsèque (décroissance du nombre d'œufs pondus ou de jeunes par portée), soit par un amoindrissement de la viabilité des œufs et des jeunes, et aussi par la conjugaison de ces deux phénomènes. Toutes ces influences néfastes atténuent le potentiel biotique ou même stérilisent complètement la population intoxiquée.

A côté de ces effets de nature démoécologique, plus ou moins limités aux populations des espèces sensibles aux pesticides, nous distinguerons d'autres actions plus complexes que nous dénommerons *biocœnotiques.*

En effet, même si une espèce vivante est absolument insensible à un pesticide donné, ses effectifs peuvent fort bien régresser par suite de la disparition des végétaux ou des animaux victimes du traitement et qui lui servent de nourriture (Fig. 5,9, n° 4). D'autre part, la destruction des plantes-hôtes par les herbicides élimine *ipso facto* les insectes et autres invertébrés dont elles constituent l'habitat et qui leur sont inféodés.

D'autres conséquences écologiques de l'usage des pesticides se caractérisent au contraire par la pullulation d'espèces dont les populations étaient de densité assez faible avant le traitement.

Celles-ci résultent soit de la disparition d'une espèce concurrente, aux exigences d'alimentation ou de nidification voisines, soit de l'élimination de ses prédateurs et parasites. L'usage des pesticides provoque de façon inéluctable de telles perturbations biocœnotiques, appelées souvent *"ruptures d'équilibres biologiques"* (Fig. 5.9, n° 6 et n° 7). Elles se traduisent parfois, fait paradoxal en apparence, par un accroissement des effectifs de la population que l'on se proposait d'éliminer.

Les effets directs

Les effets directs des traitements pesticides sur la flore et la faune sont souvent plus importants qu'ils ne pourraient paraître au premier abord. L'usage des herbicides a profondément modifié le couvert végétal des agroécosystèmes. Les mauvaises herbes adventices des céréales et d'autres plantes cultivées ont été éliminées par ces pesticides, non seulement des zones de culture, but que l'on se proposait d'atteindre, mais aussi des bordures des champs et autres stations refuges qui montrent aujourd'hui un important appauvrissement de leur flore. Cela résulte de la très grande sensibilité des dicotylédones aux herbicides employés en céréaliculture : la dérive des brouillards de traitements, aussi faible soit-elle, provoque des effets irréversibles sur ces plantes des moissons que les botanistes

DU CENTRE UNIVERSITY LIBRARY

appellent *messicoles.* Aymonin (1972) signale que des espèces d'adventices comme l'*Asperula arvensis* ont pratiquement disparu du bassin parisien. Cet auteur rappelle aussi que des espèces autrefois aussi banales que les nigelles, les nielles, les *Lychnis githago* ou les *Delphinium* présentent dans les zones de grande culture une diminution d'effectifs qu'il estime de 75 % par rapport à leur valeur initiale. Il écrit : *"sur le plateau de Beauce, démentiellement traité aux désherbants, il arrive de parcourir 1 km² de blé sans rencontrer un seul bleuet ou coquelicot. Cette dégradation de la flore messicole s'étend à toutes les espèces".*

L'usage du 2,4,5 T comme débroussaillant, dont l'introduction en France compte d'actifs partisans, pourrait aussi se traduire par l'élimination sur de vastes surfaces d'un certain nombre d'espèces arbustives. Enfin, le conflit au Vietnam a montré que l'usage d'herbicides, même en une seule application, pouvait provoquer la mort d'espèces tropicales arborées de grande taille. Les arbres prédominants dans la mangrove, — cet écosystème particulier aux basses terres inondées des zones d'estuaires tropicales — ont subi de lourds dommages à la suite de l'emploi des défoliants auxquels ils paraissent des plus sensibles. L'*Avicennia marina,* le *Rhizophora conjugata,* les *Brugueria parviflora* et *conjugata,* le *Cerisops candoleana*, qui constituent le fond du boisement des mangroves, n'ont pas survécu aux épandages de ces produits, effectués sur de vastes surfaces dans le delta du Mékong (Orians et Pfeiffer, 1970). De même, les *Pterocarpus,* les *Lagerstroemia* et diverses césalpiniées arborescentes des forêts de montagne auraient subi des pertes irrémédiables, à la suite des campagnes de défoliation entreprises par l'armée américaine pendant la guerre du Vietnam.

Les traitements insecticides peuvent aussi provoquer de fortes mortalités dans le peuplement animal situé à l'intérieur ou au voisinage des zones traitées par intoxication aiguë d'individus exposés accidentellement à de trop fortes doses de matières actives.

C'est surtout à la suite de pulvérisations insecticides effectuées au-dessus de forêts que l'on a parfois relevé d'importantes intoxications dans l'avifaune. Ainsi, Finley (1965) a signalé une diminution de 87 % des effectifs du peuplement ornithologique à la suite du traitement au phosphamidon d'une forêt de 4 000 ha, dans le Montana, que l'on voulait protéger des attaques d'une chenille tordeuse des conifères *(Choristoneura fumiferana).* Les vingt-sept espèces d'oiseaux qu'abritait ce boisement de *Pseudotsuga menziesii* furent affectées à des degrés divers. Certains insectivores, comme les grimpereaux, furent virtuellement éliminés. Des espèces de grande taille, comme le tetras bleu *(Dendragapus obscurus),* résistèrent mieux au phosphamidon, tout en présentant une sérieuse baisse de leurs effectifs.

La dispersion d'insecticides sur de vastes territoires, à l'aide d'avions ou d'hélicoptères, a provoqué en certaines occasions de véritables hécatombes dans les populations animales qui les peuplaient.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Un des plus tristes exemples des graves conséquences que peuvent présenter de tels abus d'emploi de produits phytosanitaires est constitué sans conteste par la gigantesque campagne "d'éradication" de la fourmi de feu *(Solenopsis soevissima)* entreprise aux Etats-Unis à la fin des années 50. Celle-ci affecta plus de 110 000 km^2 répartis dans le Texas, en Louisiane, en Alabama et dans divers autres Etats du Sud-Est américain ! Les surfaces furent traitées par voie aérienne à l'aide de granulés d'heptachlore et de dieldrine à raison de 2,5 kg/ha la première année, puis 1,4 kg/ha les deux années suivantes. Si cette opération, assez rentable pour "l'agro-business", n'eut même pas le mérite d'atteindre l'objectif proposé, — l'éradication de la fourmi de feu —, elle aboutit en revanche à des effets catastrophiques pour la faune des territoires traités avec ces insecticides. Les populations de grives, merles migrateurs, alouettes, et autres passériformes furent particulièrement affectées. Il en fut de même pour les peuplements de colin de Virginie. Cette espèce fut éliminée des zones traitées dans l'Alabama et montra une diminution de 88 % de ses effectifs dans l'Arkansas. Des reptiles : serpents (*Thamnophis*), faux caméléons *(Anolis)* furent très sérieusement contaminés par l'heptachlore et disparurent pendant plusieurs années de diverses localités. Enfin, l'entomofaune terricole présenta une forte baisse de sa densité de population, évaluée à 40 % dans les échantillons de sols prélevés dans l'Arkansas (d'après divers auteurs cités dans De Witt et George, 1960).

L'usage des graines enrobées a aussi provoqué de fortes mortalités dans les espèces aviennes granivores de nos campagnes.

Ces semences constituent une redoutable menace pour l'avifaune dans les régions de céréaliculture. Elles se préparent par enrobage de la graine à l'aide d'une matière adhérente qui adsorbe un insecticide (aldrine, dieldrine, heptachlore ou lindane) et un fongicide (organomercuriel, par exemple). Ces pesticides ont pour rôle de protéger la plantule contre les attaques des insectes terricoles ou des champignons phytopathogènes divers. En Grande-Bretagne, Turtle, Taylor et Wright (1963) ont nourri expérimentalement des pigeons ramiers *(Columba palumbus)* avec des aliments contaminés par ces insecticides. L'absorption de 143 ppm d'aldrine ou de 113 ppm d'heptachlore s'est révélée mortelle pour les oiseaux étudiés. Leurs cadavres renfermaient respectivement 20 et 10 ppm de ces substances dans leurs tissus musculaires. Des investigations entreprises par ces auteurs sur le terrain leur ont permis de répertorier, en 1961, plus de quatre vingts accidents consécutifs à l'usage des graines enrobées, dans le seul comté d'Angleterre où est situé leur laboratoire. L'analyse de trois cents cadavres d'oiseaux trouvés morts dans les champs (surtout des pigeons et divers gallinacés) montra qu'ils renfermaient de 2,2 à 26 ppm de dieldrine et de 5,5 à 53 ppm d'heptachlore dans leurs muscles, concentrations comparables à celles qui résultent de l'absorption de doses léthales en laboratoire.

MCGILL UNIVERSITY LIBRARY

Malgré de fréquentes dénégations, certains fongicides organomercuriels peuvent également provoquer des intoxications aiguës dans l'avifaune. Ainsi, le paratolyle-éthyl-mercure-sulfonanilide s'est avéré particulièrement nocif pour les faisans (Spann et coll., 1972). L'alimentation de ces oiseaux avec des grains contaminés par 30 ppm de ce composé provoque leur mort après 2 ou 3 mois de ce régime.

Cependant, plus encore que d'autres substances pesticides, le principal danger des fongicides organomercuriels réside en leur incroyable potentiel d'accumulation dans l'organisme animal, à l'image de la plupart des autres formes organiques du mercure. Horstadius (1965) rapporte que des faisans tués pendant la saison de chasse en Suède renfermaient dans leurs tissus des doses de mercure neuf cents fois supérieures au maximum admis dans l'alimentation humaine par l'OMS ! On concevra que les prédateurs qui ingèrent des animaux ainsi contaminés s'exposent à de redoutables intoxications chroniques.

EFFETS INDIRECTS DES TRAITEMENTS PESTICIDES

La plupart des conséquences écologiques des traitements pesticides ressortent d'actions indirectes qui se manifestent à plus ou moins long terme.

Effets démoécologiques.

Nous réunissons dans une première catégorie d'effets, qualifiés de *démo-écologiques,* diverses influences néfastes qui conduisent à une régression des populations contaminées. Celle-ci résulte des intoxications chroniques provoquées par l'absorption continue de résidus pesticides avec la nourriture. Les effets pernicieux, cumulatifs, des doses ainsi ingérées se manifestent par une mortalité accrue dans toutes les classes d'âge (augmentation du coefficient m) et un amoindrissement du potentiel biotique (diminution du coefficient b).

La modification des valeurs normales de ces deux facteurs à la suite de l'absorption de ces toxiques provoque la baisse, voire l'annulation, du coefficient intrinsèque d'accroissement naturel r des populations ainsi contaminées, ce qui peut conduire en certains cas à la disparition quasi complète d'espèces sensibles à tel ou tel composé.

Ces effets indirects des pesticides résultent de leur passage dans la biomasse, avec accumulation dans chaque niveau trophique, de sorte que les concentrations atteintes dans l'organisme des carnivores sont toujours très élevées. Ils ne se manifestent, en règle générale, qu'avec des substances peu ou pas dégradables (cf. chap. III, Fig. 3.7).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La pollution de la biomasse commence par le maillon initial, celui des producteurs primaires. Les végétaux peuvent en effet absorber par transformation radiculaire les pesticides qui contaminent les sols.

Le tableau XXXVIII B figure le taux auquel l'heptachlore présent dans un sol à une concentration assez faible, égale ou inférieure au ppm, s'est accumulé dans les tissus de diverses plantes cultivées.

Tableau XXXVIII B – Concentration de l'heptachlore par des végétaux cultivés dans des sols contaminés par cet insecticide (*)

Espèce	*Niveaux de résidus dans le sol (en ppm)*	*Organe analysé*	*Taux accumulé (en ppm)*
Luzerne* (*Medicago sativa*)	0,784	parties aériennes de la plante	0,028
Carotte* (*Daucus carotta*)	0,19	racines	0,14
Pomme de terre* (*Solanum tuberosum*)	"	tubercules	0,05
Radis* (*Raphanus sativus*)	"	racine	0,03
Arachide* (*Arachis hypogaea*)	0,16	racine	0,67
Maïs** (*Zea mays*)	1,0	graine	0,005
Soja** (*Glycine maxima*)	1,0	graine	0,11

* D'après Lichtenstein et coll. dans Newson (1967).
** D'après Bruce et coll. (1966),

Les plantes peuvent donc absorber et, dans une certaine mesure, concentrer les pesticides présents dans les sols. Il n'est pas rare, par exemple, de trouver dans les carottes des taux d'insecticides organochlorés nettement supérieurs à ceux auxquels ces substances existent dans les terres de culture. Les pesticides ainsi accumulés dans la biomasse végétale vont ensuite contaminer l'ensemble des chaînes trophiques.

Toutes les recherches effectuées au cours de la dernière décennie révèlent la présence de traces d'insecticides organochlorés chez de nombreux vertébrés et dans la quasi-totalité des espèces de vertébrés étudiées. Les travaux de Moore et coll. (1964 et suivantes) sur la contamination de l'avifaune britannique par ces insecticides donnent une excellente illustration de ce phénomène. Ils montrent que les taux de résidus sont plus faibles chez les espèces végétariennes que chez les omnivores et atteignent leur valeur maximale chez les rapaces, en particulier l'épervier *(Accipiter nisus),* oiseau dont les proies préférées sont des oiseaux à régime mixte ou insectivore [1] (Fig. 5.10).

(1) Ce rapace occupe donc le quatrième niveau trophique dans les réseaux où il s'insère.

BAU SCIENCE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

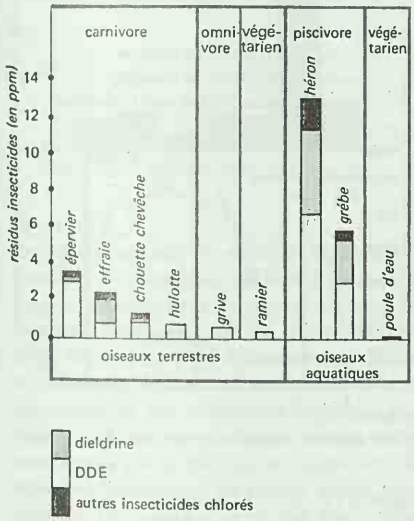


Figure 5.10
Variations du taux de résidus d'insecticides organochlorés chez divers oiseaux des Iles Britanniques. Le DDE est l'un des principaux métabolites formés lors de la dégradation du DDT par divers tissus des animaux contaminés par cet insecticide. Il prédomine souvent par rapport au DDT dans les analyses des prélèvements biologiques. On a d'ailleurs pu montrer que les Vertébrés stockent plus facilement le DDE que le DDT dans leurs tissus. D'après Moore et Walker, Nature, 1964, n° 201, p. 1073

D'autres recherches ont montré la grande sensibilité à la pollution des sols par les insecticides persistants de toutes les chaînes trophiques dans lesquelles sont insérés les vers de terre. Les Oligochètes sont en effet des détritiphages qui se nourrissent des détritus végétaux constituant l'humus. Ce régime les conduit à ingérer des volumes considérables de terre (plusieurs fois leur poids corporel chaque jour), pour subvenir à leurs besoins métaboliques. Ils se comportent ainsi comme de puissant concentreurs biologiques pour les substances diverses peu biodégradables que l'homme incorpore aux sols. Comme les vers de terre paraissent assez résistants à la plupart des pesticides connus, ils peuvent accumuler ces substances dans leur organisme, à des taux assez considérables, sans paraître en être incommodés. Ainsi, des *Lumbricus terrestris* et des *Allobophora caliginosa* prélevés dans des sols contaminés par 10 ppm de DDT renfermaient en moyenne dans leurs tissus 140 ppm de cet insecticide (Hunt, 1965). Les risques d'intoxication chronique sont donc particulièrement élevés chez les oiseaux dont la ration alimentaire comporte une grande quantité de vers de terre. La bécasse américaine, *Philohela minor,* et divers passeriformes des Etats-Unis ont subi une diminution significative de leurs effectifs à la suite de la contamination des sols par les insecticides organochlorés. La dispersion d'heptachlore sur les territoires où hiverne *Philohela minor,* dans le cadre de la campagne d'éradication de *Solenopsis soevissima,* les traitements aériens au DDT des forêts où nidifie cette espèce (Wright, 1960), ont joué un rôle déterminant dans la régression de ses effectifs. L'alimentation expérimentale de bécasses avec des vers de terre contaminés à des doses d'heptachlore de 2,86 ± 0,24 ppm, comparables à celle que renferment les échantillons de ces annélides prélevés en Louisiane dans leur territoire d'hivernage, provoque en 35 jours la mortalité de 50 % des oiseaux intoxiqués (Stickel et coll., 1965). Ces auteurs concluent que les doses d'heptachlore utilisées dans la lutte contre la fourmi de feu provoquent une contamination des sols inadmissible pour *Philohela minor.*

La campagne d'éradication des Scolytes de l'orme dans le nord-est des Etats-Unis s'est aussi avérée catastrophique pour l'avifaune. Celle-ci fut fortement affectée par les traitements de printemps au DDT effectués pendant quinze à vingt années consécutives selon les localités. Il s'ensuivit de véritables hécatombes dans les populations de passereaux nicheurs et autres espèces, qui vivent dans les parcs des zones suburbaines. Malgré l'avis défavorable de divers experts, qui contestaient l'efficacité du DDT et du méthoxychlore, également utilisé dans la lutte contre les scolytides, les pulvérisations de ces insecticides furent effectuées chaque printemps et parfois à plusieurs reprises au cours de la belle saison. Wurster et coll. (1965) évaluent entre 30 et 90 % selon les espèces la réduction du peuplement des passereaux que provoquèrent ces traitements dans l'Etat du New Hampshire. Les effectifs du merle migrateur *(Turdus migratorius),* espèce qui se nourrit surtout de

B.C. ... EMINESCU "IA
GE... ...IE-GEOGRAFIE
BCU IASI / CONTRA EXEMPLAR

vers de terre, diminuèrent de 70 % dans la localité de Hanover (Fig. 5.11). L'intoxication de ces oiseaux résulte de l'ingestion de vers de terre contaminés et non d'un contact direct avec le DDT ou le méthoxychlore au moment de la pulvérisation, car la toxicité aiguë de ces substances est assez faible pour les oiseaux.

Les études de Dimond et coll. (1970) ont par ailleurs apporté la preuve incontestable d'une accumulation du DDT dans la chaîne trophique :

sols forestiers ⟶ vers de terre ⟶ merle migrateur.

La pollution des sols par les fongicides organomercuriels utilisés en agriculture se traduit aussi par une dangereuse contamination des réseaux trophiques. Dès 1960, plusieurs chercheurs suédois suspectaient les intoxications chroniques par le mercure d'être déterminantes dans le déclin de l'avifaune de leur pays. L'analyse d'oiseaux trouvés morts ou mourants mit en évidence la forte pollution des agroécosystèmes par les anti-fongiques organomercuriels. Le taux de mercure dans le foie et les reins de cadavres de pigeons était compris entre 8 et 45 mg par kg ; il s'élevait de 11 à 136 mg/kg chez divers fringilles, passereaux à régime granivore et de 28 à 150 mg/kg chez divers gallinacés omnivores ! C'est évidemment l'organisme des rapaces qui présentait les plus fortes concentrations. Sur 70 autours et buses analysés, 67 renfermaient des taux anormaux de mercure, généralement proches de 100 mg/kg. Les œufs d'un Pygargue *(Haliethus albicilla)*, aigle vivant dans les régions maritimes, contenaient de 3,5 à 11 mg/kg de ce métal. Des chouettes hulottes *(Strix aluco)*, trouvées mortes une dizaine de jours après l'ensemencement des champs environnants, ne renfermaient pas moins de 270 mg/kg de mercure dans leurs viscères (d'après Otterlind et Lenerstedt dans Horstadius, 1965).

Les travaux de Berg, Johnels, Sjostrand et Westermark (1966) ont montré le rôle déterminant des fongicides organomercuriels, utilisés pour l'enrobage des semences, dans cette régression de l'avifaune suédoise. Pour mener à bien leurs investigations, ils ont analysé la teneur en mercure des plumes de nombreuses espèces d'oiseaux conservées depuis 1815 dans divers musées de leur pays. En effet, comme les phanères des vertébrés à sang chaud, poils, plumes et autres formations tégumentaires constituent une des voies naturelles d'élimination du mercure , la concentration de cet élément dans celle-ci constitue un bon indicateur du degré de contamination de leur organisme. Ces chercheurs purent ainsi montrer plusieurs faits d'importance capitale. Tout d'abord, alors que la teneur en mercure des plumes de tous les échantillons analysés est restée remarquablement constante pendant plus de cent ans, celle-ci a présenté une subite élévation à partir de 1940, date à laquelle les fongicides à base d'alkylmercure furent introduits en Suède pour le traitement des semences (Fig. 5,12). Ils ont aussi constaté une excellente corrélation entre la teneur des plumes en mercure et la place occupée par l'espèce considérée dans les

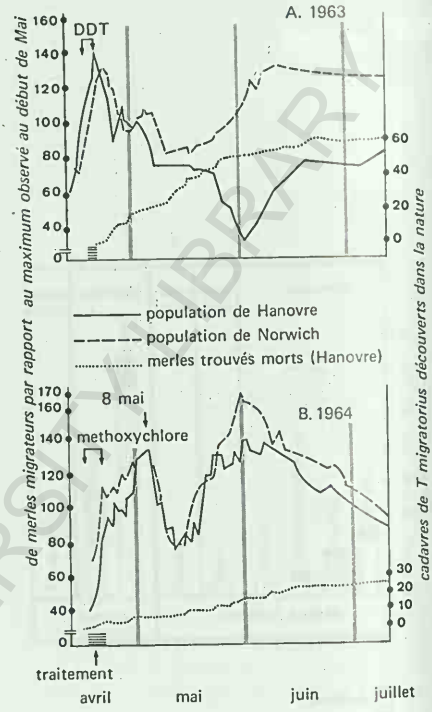


Figure 5.11
Effets des traitements au DDT et un méthoxychlore sur les populations de merles migrateurs (Turdus migratorius) *dans le New Hampshire. On remarque une forte mortalité à la suite des traitements effectués au milieu du printemps. D'après Wurster et al., Ecology, vol. 46, 1965, n° 4*

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

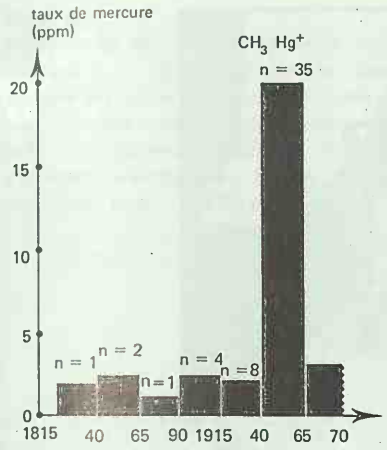


Figure 5.12
Contamination par le mercure de l'avifaune suédoise. En ordonnée est figuré le taux de mercure contenu dans les plumes d'autour des palombes (Accipiter gentilis) *conservées dans divers Museum suédois,* n *représente le nombre d'échantillons étudiés. L'introduction à la fin des années 30 des traitements fongicides organomercuriels a provoqué une contamination considérable par le mercure de l'organisme des rapaces. L'interdiction de l'usage de ces pesticides en 1965 s'est traduite par une diminution spectaculaire de la teneur en mercure des plumes de cet oiseau. D'après Jöhnels et Westermark* in *Lundholm, 1970, Reidel ed. p. 198*

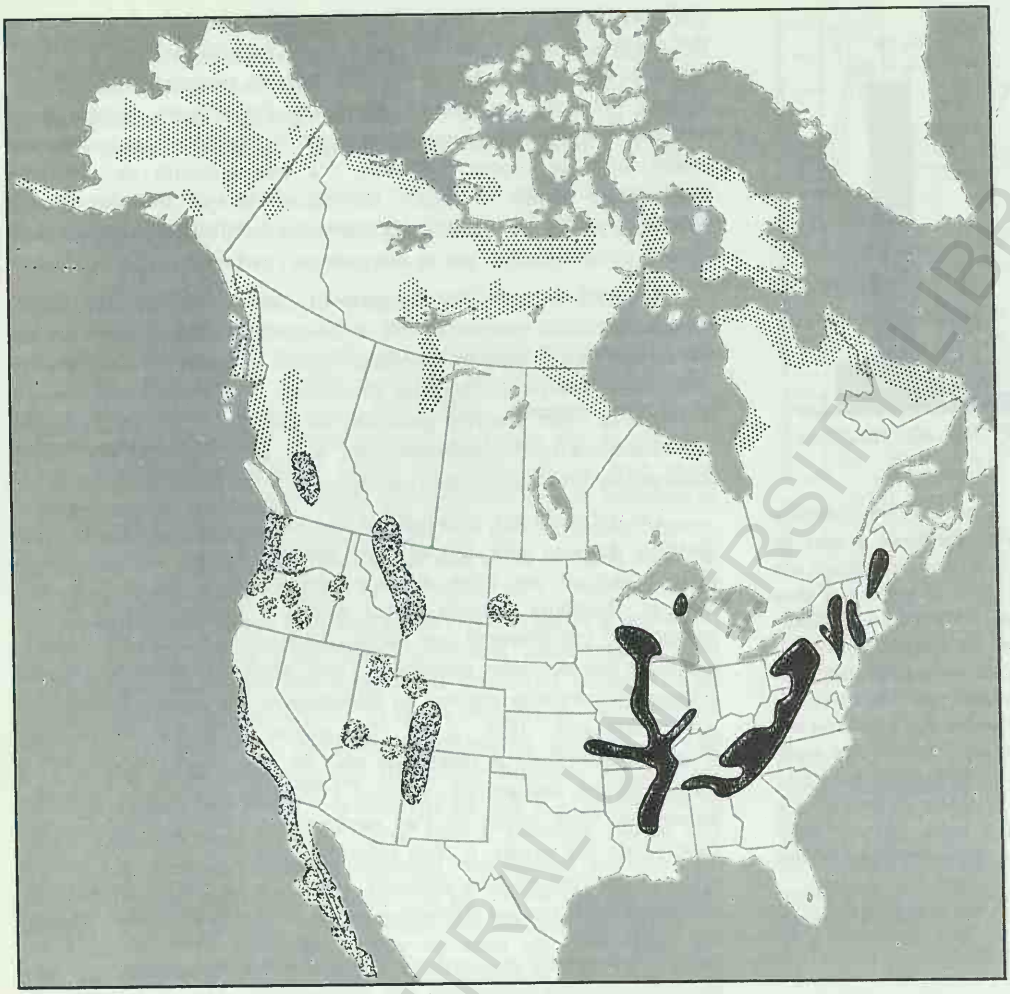
chaînes alimentaires. Ainsi, ils relèvent 6 µg/g chez des faisans et des perdrix (à régime mixte granivore et insectivore) tués en 1960, 40 µg/g chez le grand-duc, 60 µg/g chez le pygargue et le faucon pèlerin qui sont des carnivores stricts. Par ailleurs, la teneur en mercure des plumes d'oiseaux comme le lagopède des saules, qui vivent loin des zones cultivées, n'a pas présenté de variation significative depuis le début du siècle, ce qui montre le rôle déterminant des fongicides organomercuriels utilisés en agriculture dans la contamination par le mercure de l'avifaune suédoise.

La pollution de l'environnement par les résidus des traitements pesticides provoque des intoxications chroniques chez un grand nombre d'espèces animales. Celles-ci peuvent produire de graves troubles physiologiques conduisant à la mort des individus contaminés. Mais en règle générale, les perturbations des fonctions reproductrices sont prépondérantes, avec des conséquences démo-écologiques tout aussi catastrophiques.

Les rapaces, aux populations peu nombreuses et de potentiel biotique souvent très faible, sont particulièrement vulnérables à cette pollution par suite de leur position dans les chaînes trophiques. Plusieurs faucons, entre autres le faucon pélerin *(Falco peregrinus)* ont présenté une baisse catastrophique de leurs effectifs au cours des dernières décennies. Cette espèce a même totalement disparu de certaines régions en Scandinavie, en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis, (Fig. 5.13). De même le balbuzard pêcheur *(Pandion haliethus)* se raréfie de plus en plus, tant aux Etats-Unis qu'en Europe occidentale. Schmid (1966) rapporte que dans une localité du New Jersey où l'on recensait en 1937 quelque 37 nids peuplés de 53 jeunes, il n'en subsistait plus que 8 en 1963, dont un seul renfermait des oisillons vivants à la même période de l'année. L'aigle chauve *(Haliethus leucocephalus),* emblème national des Etats-Unis, est aussi en voie d'extinction, On n'en comptait guère que 3 500 individus pour l'ensemble de la fédération en 1963 (Chura et Stewart, 1967) ; de plus leurs succès de nidification paraissaient plus réduits qu'autrefois, avec un moindre nombre de jeunes. En Grande-Bretagne et en Suède, l'épervier *(Accipiter nisus)* et l'aigle royal *(Aquila chrysaetos)* se sont considérablement raréfiés. Ratcliffe (1964 et suivantes) met en rapport la régression de cette dernière espèce dans le nord de l'Ecosse avec l'introduction du DDT et de la dieldrine dans les zones de nidification. De même, plusieurs écologistes ont démontré le rôle déterminant de la contamination par le DDT des aires d'hibernage et de nidification de l'aigle chauve, dans la raréfaction de cette espèce (Stickel et coll., 1966).

Depuis les travaux de De Witt (1955), de nombreux chercheurs ont contribué à l'étude des processus physiologiques par lesquels les pesticides amenuisent le potentiel biotique des espèces aviennes. La diminution de fécondité résulte de causes multiples. Parmi les effets dont l'influence est déterminante sur la régression de nombreux oiseaux, nous citerons le retard dans la date de la première ponte, une diminution du nombre d'œufs pondus, parfois

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

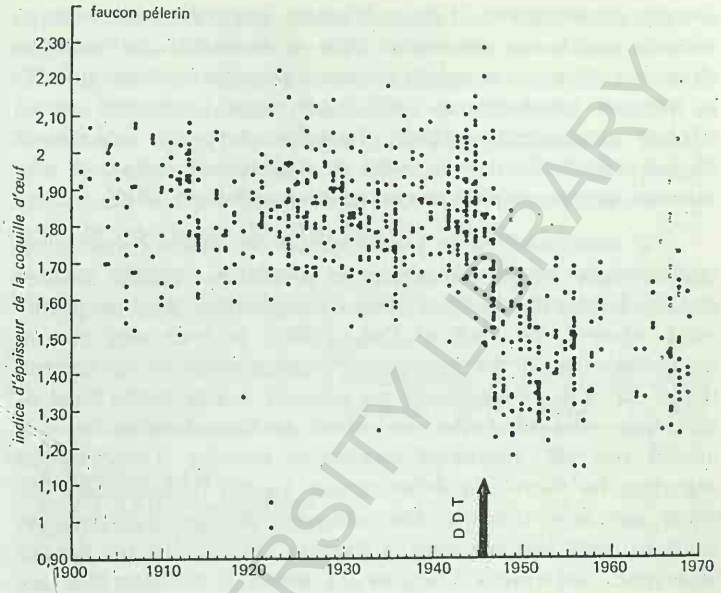


même la stérilité des femelles et leur incapacité d'effectuer une couvée de remplacement. D'autres facteurs, tout aussi déterminants dans la régression de nombreuses espèces, résident dans la fragilisation de la coquille dont la calcification ne s'effectue plus normalement, et dans une forte mortalité embryonnaire et juvénile. Ainsi, les œufs pondus par les femelles intoxiquées sont souvent brisés au nid, leur taux d'éclosion est nettement inférieur à la normale et les jeunes poussins périssent en grand nombre dans la première semaine de leur vie postembryonnaire. Ratcliffe (1967) a démontré l'existence d'une correlation entre le taux d'insecticides organochlorés présents dans certains œufs de rapaces, la fragilité anormale de leur coquille et la fréquence des échecs de reproduction observés dans ces espèces. Cet auteur a mis en rapport le déclin des populations de faucon pélerin en Angleterre avec le nombre anormalement élevé d'œufs brisés que l'on dénombre dans leurs nids, depuis quelques années. Ratcliffe précise que l'on n'a

Figure 5.13
Statut du Faucon pélerin (Falco peregrinus) *en Amérique du Nord. La carte de la répartition de cette espèce se superpose très exactement avec celle de l'intensité de l'usage des insecticides organochlorés. D'après Peakall, Scient. Amer., avril 1970, p. 73*

MCGILL UNIVERSITY CENTRAL LIBRARY

Figure 5.14
Changements dans l'épaisseur de la coquille des œufs du faucon pélerin en Grande-Bretagne provoqués par l'introduction du DDT dans l'environnement. o échantillons provenant des Highlands écossais. • échantillons provenant d'Angleterre. D'après Ratcliffe, Jour. Appl. Ecol., 7, 1970, p. 76



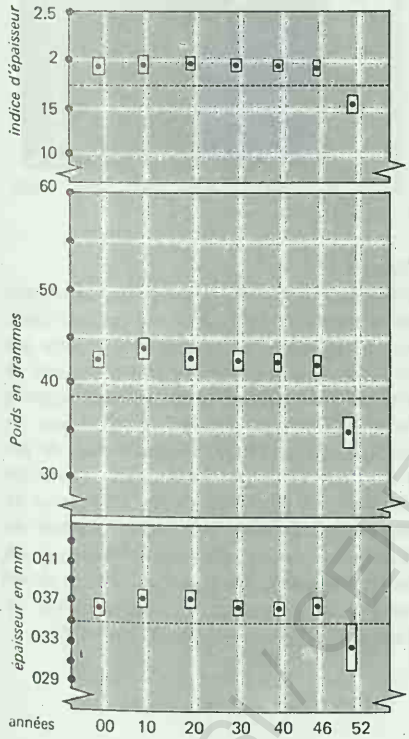


Figure 5.15
Variation dans les caractères biométriques de 614 œufs de faucon pélerin prélevés en Californie entre 1891 et 1952. On remarque l'apparition d'un soudain amincissement de la coquille après 1946, date où commença l'utilisation à vaste échelle du DDT dans cet Etat. D'après Hickey et Anderson, Science, vol. 162, n° 3850, 1968, p. 271-3

cité que trois cas d'œufs endommagés au nid entre 1904 et 1950 dans cent neuf aires visitées, alors qu'entre 1952 et 1961 on comptait quarante-sept cas dans cent soixante-huit aires ! Cet auteur a aussi montré l'existence d'une atténuation du rapport entre le poids de la coquille et sa longueur axiale, à partir de 1947, chez le faucon pélerin et l'épervier *(Accipiter nisus)*. Cette modification due à un amincissement de la coquille coïncide dans le temps, avec l'époque où le DDT fut introduit dans le milieu naturel britannique (Fig. 5.14). Hickey et Anderson (1968) ont comparé l'épaisseur et le poids de la coquille de diverses populations de faucons, d'aigles, de balbuzards et de goélands argentés stables ou déclinantes. Ces auteurs ont trouvé que les coquilles d'œufs de faucons pélerins prélevées en 1950 dans les nids du New Jersey, Etat où l'espèce a totalement disparu depuis cette date, pesaient 26 pour cent de moins que la moyenne alors que leur poids était normal à la même époque dans les régions où l'espèce s'est maintenue (Fig. 5.15). Ces auteurs ont étudié avec soin les mensurations des œufs de cette espèce conservés dans divers musées américains. Ils ont montré que le poids et l'épaisseur de la coquille sont restés stables de 1891 à 1946, année à partir de laquelle ces caractères biométriques baissèrent subitement, fait que l'on ne peut manquer de mettre en rapport avec le début de l'emploi du DDT ! L'alimentation expérimentale en laboratoire de faucons de prairie *(Falco sparverius)* avec de la nourriture contaminée par quelques ppm de DDT a confirmé l'influence pernicieuse de cet insecticide sur le dépôt du calcium dans la coquille

DDT ASU/CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

(Porter et Wiemeyer, 1969). D'autres recherches ont mis en évidence une bonne correlation entre la diminution de l'épaisseur de la coquille et le niveau de contamination des œufs par le DDE, le principal métabolite du DDT produit par l'organisme animal (Hickey et Anderson, 1968). Toutefois, les taux inférieurs à 25 ppm (fig. 5.16) ont un effet de fragilisation nettement plus accentué que les concentrations supérieures (Peakall, 1970).

Par quels mécanismes physiologiques les résidus d'insecticides organochlorés peuvent-ils altérer le dépôt de calcium dans la coquille ? Peakall (1970) en trouve l'explication dans un phénomène observé par Hart et Coll. (1963) se traduisant par un antagonisme entre les insecticides organochlorés et les barbituriques. Ces auteurs constatent par exemple que de faibles doses de chlordane inhibent l'effet somnifère de l'hexobarbital. Ils ont montré que cet insecticide accélère la synthèse d'enzymes qui dégradent les barbituriques en dérivés inactifs hydrosolubles, éliminés par voie urinaire. Ces enzymes, diverses hydrolases et oxydases, sont localisés dans la fraction microsomale des cellules hépatiques. Des travaux ultérieurs ont permis de constater que tous les insecticides organochlorés stimulent la synthèse de tous ces enzymes des microsomes hépatiques à des concentrations aussi faibles que la ppm.

Ce phénomène s'accompagne de redoutables perturbations physiologiques : la balance des œstrogènes est altérée. Kupfer (1969) a montré que 25 mg/kg de DDT injectés à des rats accélèrent la dégradation de tous les stéroïdes. Cette dose d'insecticides suffit pour doubler la vitesse de catabolisation de la testostérone, du 17 βœstradiol, de la progestérone et de la désoxycorticostérone en métabolites hydrosolubles.

Cette perturbation de la balance des hormones sexuelles sous l'effet de faibles doses d'insecticides organochlorés apporte une explication des mécanismes physiologiques par lesquels ces substances entravent la reproduction des oiseaux. En effet, les hormones œtrogènes contrôlent l'ensemble des phénomènes physiologiques de la reproduction, entre autres le stockage dans la moelle osseuse du calcium nécessaire à l'élaboration de la coquille. Cette réserve est constituée au printemps, au début du cycle reproducteur. Il est évident qu'une diminution du taux d'œstrogènes, consécutive à la contamination de l'organisme avien par le DDT, abaissera d'autant l'importance du taux de calcium disponible pour la sécrétion de la coquille. En outre, Peakall (1969) a montré que l'injection de DDE 48 heures avant la ponte provoquait un amincissement important de la coquille. Dans ce cas, ce n'est pas le stockage qui est perturbé mais il se produit une inhibition du système enzymatique (anhydrase carbonique) assurant le dépôt du carbonate de calcium dans la coquille.

Les échecs de reproduction observés chez les oiseaux sous l'effet de la contamination de leur organisme par les pesticides

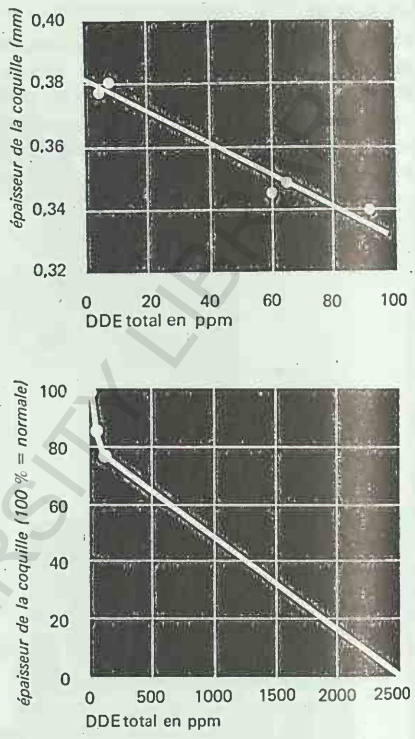


Figure 5.16
Corrélation entre le degré de contamination des œufs par le DDE et la diminution d'épaisseur de la coquille. Le schéma A montre que les dimensions moyennes obtenues à partir de cinq colonies différentes de goélands argentés s'ajustent sur une droite de régression en fonction du degré de contamination de ces œufs par le DDE. En B, sont figurés les résultats expérimentaux de Peakall obtenus en laboratoire sur une tourterelle. Au-delà de 25 ppm, les œufs deviennent rares car les femelles mangent ceux qui se brisent ou les rejettent hors du nid. A, d'après Hickey et Anderson, 1968 ; B, d'après Peakall 1970

proviennent aussi d'une diminution de leur fécondité. Ainsi la dieldrine, à la différence du DDT, n'interfère pas avec le métabolisme du calcium mais elle retarde le début de la ponte et réduit le nombre d'œufs pondus. Des faisans nourris avec 25 ppm de dieldrine ou 50 ppm de toxaphène présentent une sensible diminution de fécondité, alors que le nombre d'œufs pondus n'est pas modifié par le DDT incorporé à raison de 200 ppm dans l'alimentation de ces oiseaux (Rudd et Guenelly, 1956).

Tableau XXXIX — Effets de la contamination de la nourriture par 1000 ppm de divers Herbicides sur la fécondité de diverses espèces aviennes

Herbicides	*Nombre moyen de poussins par couvée*		
	Colin de Virginie	*Faisan*	*Col-vert*
Dalapon	4,2	6,3	2,6
Acétamide du 2,4 D	2,3	5,1	0
Ester du 2,4 D butoxyméthanol	—	—	0
Sel de la dimithylamine du 2,4 D	—	—	0
MCPA	—	2,9	—
2,4,5 T	—	—	0
Témoin non traité	29,1	10,7	12,4

* D'après De Witt, Stickel et Springer (1963).

On a d'ailleurs vérifié que la dieldrine, l'heptachlore et les polychlorobiphényles, —ces agents plastifiants très répandus de nos jours dans l'environnement et qui ne sont pas utilisés comme pesticides,— provoquent une dépression accusée du taux de certaines hormones sexuelles. Ces substances, en diminuant au printemps le taux d'œstrogènes dans le sang, retardent le début de la nidification, phénomène souvent constaté dans les espèces aux populations déclinantes et d'autant plus grave qu'il affecte des individus situés au nord de leur aire de distribution géographique, où la saison favorable à la reproduction est de courte durée.

Les herbicides peuvent aussi réduire sensiblement la fécondité des oiseaux. Le dalapon, divers dérivés du 2,4 D, le 2,4,5 T et le MCPA diminuent le nombre de jeunes par couvée et même stérilisent des femelles de colins de Virginie, de faisans et de canard-col vert (*Anas platyrhynchos*) contaminés avec ces herbicides.

De récentes recherches effectuées par Lutz et coll. (1970) et Didier (1972) permettent de mieux comprendre les modalités d'action des herbicides sur la fertilité des oiseaux. L'aspersion d'œufs avec des bouillies de 2,4 D, de 2,4,5, T et de simazine réalisées aux doses conseillées pour les traitements phytosanitaires provoquent d'importantes anomalies du développement embryonnaire. La morphogénèse des membres postérieurs est perturbée, ce qui explique les difficultés et les échecs d'éclosion. En outre, l'organogénèse des glandes reproductrices est aberrante, avec formation d'intersexués, ce qui concourt aussi à réduire le potentiel biotique des populations aviennes ainsi contaminées.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Effets biocœnotiques

Les *effets biocœnotiques* de la pollution par les pesticides, malgré leur grande importance pratique, sont beaucoup plus mal connus que les précédents. Même ceux qui interfèrent avec la production agricole —par exemple la diminution du nombre d'insectes utiles liée à l'usage des insecticides— n'ont pas été aussi étudiés que l'on pourrait le penser.

Diminution de nourriture disponible

Une première catégorie d'effets biocœnotiques est constituée par la *diminution de nourriture* tant végétale qu'animale *disponible* pour la faune dans les agroécosystèmes ou dans tout autre milieu contaminé par les pesticides.

La disparition des adventices par suite de l'usage généralisé des herbicides rend inéluctable celle de l'entomofaune qui leur était inféodée. Ainsi, tous les insectes vivant sur le coquelicot (*Papaver rhoeas*) ont beaucoup régressé à la suite de l'éradication quasi complète de cette plante des zones de grande culture (Moore, 1967). Les oiseaux et les mammifères sauvages ont aussi beaucoup souffert de l'élimination des adventices par les herbicides. Elles constituaient en effet le seul couvert végétal présent dans les terres cultivées pendant la mauvaise saison.

Outre la transformation d'habitat qui en résulte, consécutive à la disparition des abris nécessaires à la nidification et à l'hivernage, leur raréfaction prive la faune sédentaire d'une source de nourriture indispensable pendant la mauvaise saison. Parmi les multiples causes de régression de la faune dans les régions de grande culture, l'usage des herbicides intervient donc de façon significative. Moore (1967) lui attribue une part prépondérante dans la diminution importante de la densité des populations de perdrix en Grande-Bretagne. En effet, dans une région d'Angleterre où l'on comptait 37,5 couples de ces oiseaux pour 100 ha en 1890, on n'en relevait plus que 20/100 ha en 1960 (d'après Pottis dans Giban et Birkan, 1970). Ce phénomène, également bien connu en France, est général dans tous les pays où l'agriculture s'industrialise. En Tchécoslovaquie, par exemple, on ne recensait plus que 400 000 perdrix pour tout le pays en 1963 contre 2,5 millions en 1955. La destruction de l'entomofaune par les insecticides constitue une autre modalité "biocœnotique" par laquelle les pesticides peuvent provoquer la régression de certaines espèces animales, de façon indirecte, en les privant de nourriture.

Finley (1961) a étudié les conséquences d'un traitement au sevin effectué dans le Montana contre des criquets. Celui-ci fit régresser de 83 % le peuplement avien. Aucun oiseau ne fut tué par cet insecticide très peu toxique pour les homéothermes. Cependant, la plupart d'entre eux migrèrent hors de la zone traitée par suite de la disparition totale des criquets et autre insectes dont

RUTGERS STATE UNIVERSITY LIBRARY

ils se nourrissaient. Cet auteur conclut que si le traitement avait été effectué un ou deux mois plut tôt, pendant la période de nidification, un grand nombre d'oisillons auraient été abandonnés par leurs parents et seraient morts d'inanition.

La contamination des eaux douces par les pesticides exerce une influence catastrophique sur la faune ichtyologique. Celle-ci semble résulter en bien des cas d'un appauvrissement des eaux en matières alimentaires animales : zooplancton, larves d'insectes, dont se nourrissent les poissons. A cet égard, les travaux canadiens relatifs aux effets des traitements aériens avec le DDT des forêts du New Brunswick méritent d'être cités ici, bien qu'ils se soient traduits en définitive par la raréfaction du peuplement en saumons des rivières qui traversent ces régions et intéressent donc les écosystèmes limniques. Ils fournissent un remarquable exemple de la complexité des conséquences écologiques de ces phénomènes de pollution.

Plusieurs publications effectuées en 1967 par les chercheurs de la station biologique de Saint-Andrew ont eu pour but d'évaluer quelles étaient les conséquences des épandages aériens de DDT effectués dans la province du New Brunswick pour détruire la chenille tordeuse (*Choristoneura fumiferana*), nuisible aux conifères, De 1952 à 1962 furent traitées dans ce but annuellement 2 300 000 ha de forêts, à raison de 1 kg/ha de DDT, soit 37 % de la surface boisée totale de la province !

Les eaux furent contaminées directement lors des épandages, mais surtout le DDT dispersé à la surface de la végétation et des sols fut entraîné dans les rivières par le ruissellement au moment des précipitations. Les poissons qui peuplaient ces cours d'eau, salmonides et cyprinides, subirent une forte réduction immédiatement après les épandages. Les alevins furent les plus touchés, leurs effectifs tombèrent à 2 à 10 % du nombre initial, celui des parrs (jeunes saumons âgés de un à deux ans) régressa de moitié. De fortes mortalités se manifestèrent à nouveau à la fin de l'automne, au moment des premiers froids. Les effets indirects du DDT : diminution importante sinon disparition de la masse de matières alimentaires disponibles, surtout des larves d'insectes aquatiques, pendant 45 jours après l'épandage (Fig. 5,17), représentent incontestablement la cause principale de cette mortalité chez les jeunes salmonides. Il en est résulté un état d'inanition fatal aux alevins et dans une moindre mesure aux parrs. Miles Keenleysides (1967) a aussi montré que le traitement bouleverse la faune entomologique des cours d'eau, de sorte que les jeunes saumons, privés de leurs proies préférées (larves d'éphémères et de phryganes), se rabattent sur tout ce qu'ils trouvent (fig. 5.18). Cependant, cette modification qualitative de leur ration alimentaire ne compense pas la raréfaction des proies normales. Aussi, le contenu gastrique des jeunes saumons capturés dans les rivières traitées est-il de volume nettement inférieur à celui des témoins et la croissance de ces individus est-elle ralentie lorsqu'ils ne meurent pas d'inanition.

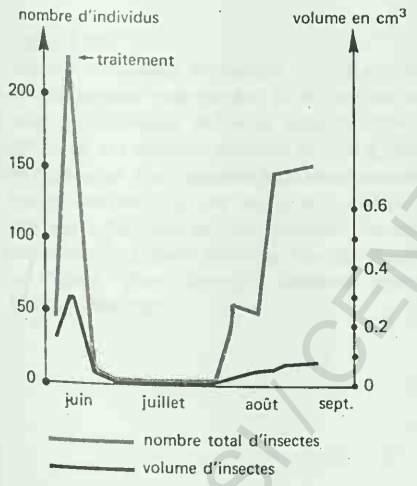


Figure 5.17
Effets d'un traitement aérien de forêts au DDT sur le peuplement entomologique d'une rivière à saumon qui la traverse. Le trait en grisé correspond au nombre d'insectes vivants par m^2 de rivière, le tracé en noir au volume de la biomasse qu'ils représentent. D'après Ide, J. Fish. Res. Board Canada, T 24, 1967, n° 4, p. 769

BOWDOIN COLLEGE LIBRARY

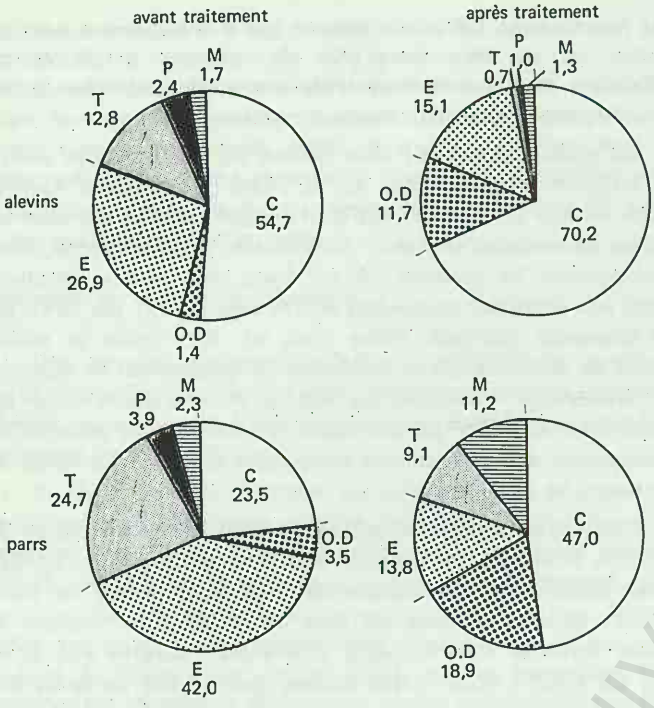


Figure 5.18
Effets de la pollution par le DDT des eaux d'une rivière à saumon sur le régime alimentaire de ces poissons. On remarque un important changement qualitatif du contenu stomacal des jeunes saumons. Chez les parrs (individus âgés de 1 à 2 ans), les larves de chironomides ne venaient qu'en 3e position, représentaient 23,5 % de la ration des individus avant le traitement. Un an après la pollution de la rivière par le DDT, la part de larves de chironomides dans le régime s'élève à 47 % alors que celle des larves d'éphémères (prédominantes dans les rivières non traitées) a régressé au 3e rang (13,8 %) derrière celles d'Odonates, dont l'importance est normalement négligeable dans la ration des jeunes saumons. On arrive à une conclusion semblable pour les jeunes alevins. Ces changements résultent de la raréfaction des larves de Phryganes et d'Ephémères, très sensibles au DDT, dans les cours d'eau pollués. C = larves de chironomides ; E = larves d'Ephémères ; M = divers ; O = larves d'Odonates ; P = larves de Perlides ; T = larves de Trichoptères. D'après M. Keenleysides in *Ramade, Sci. Progrès – La Nature, Dunod ed., déc. 1968, p. 446.*

Disparition d'espèces concurrentes

D'autres effets biocœnotiques de la pollution par les pesticides résultent de la *disparition d'espèces concurrentes.* Ce phénomène est bien connu avec les herbicides, où l'élimination de nombreuses dicotylédones consécutive à leur usage s'est traduite par la pullulation de diverses graminées (Vulpain, par exemple). L'usage systématique des dérivés de l'acide phénoxyacétique a provoqué, il y a quelques années, un accroissement de la densité des populations de diverses monocotylédones autrefois peu communes, aujourd'hui éliminées par d'autres herbicides. Le traitement des bords de route avec l'hydrazide maléique et le 2,4 D,afin d'éviter que la croissance des herbes des talus ne gène la vision des conducteurs, a provoqué en Grande-Bretagne le remplacement progressif *d'Arrhenatum elatius* et *Dactylis glomerata* par les graminées rhizomateuses *Festuca rubra* et *Poa pratensis* (Yemm et Willis, 1962).

Elimination des ennemis naturels

Une autre conséquence biocœnotique de l'usage des pesticides réside dans *l'élimination des ennemis naturels* des ravageurs que l'on cherche à détruire. En effet, l'utilisation des insecticides altère aussi inéluctablement les équilibres naturels parce qu'ils perturbent la concurrence interspécifique dans les biocœnoses. Ils présentent en particulier des effets drastiques sur les populations d'insectes entomophages endoparasites. Ce phénomène se comprendra aisément si l'on réfléchit quelque peu aux modalités d'action de ces substances. L'intensité de l'intoxication par un poison dépend, toutes choses égales par ailleurs, de la dose absorbée, laquelle

s'exprime en mg/kg de poids corporel, ou en µg/g dans le cas d'un insecte. En revanche, l'absorption d'un insecticide est un phénomène de surface : c'est un processus de pénétration transcuticulaire. Son intensité sera d'autant plus grande par rapport au poids de l'individu que sa taille sera plus faible car la surface varie comme le carré, alors que le poids varie comme le cube de la longueur. Ainsi, la surface corporelle d'un organisme sera proportionnellement d'autant plus élevée par rapport à son volume qu'il est plus petit. Donc, un traitement qui tuera 90 % de la population d'un insecte nuisible détruira à coup sûr la quasi totalité des effectifs de l'entomophage qui limitait la prolifération d'un ravageur. La destruction des zoocœnoses de prédateurs et parasites par les pesticides a pour conséquence de provoquer une résurgence rapide des populations d'insectes nuisibles que l'on se proposait d'éliminer.

La cause la plus simple de ce phénomène réside en la diminution des effectifs des populations d'insectes parasites, de sorte que le phytophage nuisible, dont les facteurs de mortalité naturelle se sont fortement atténués, croît sans entrave (Fig. 5.19).

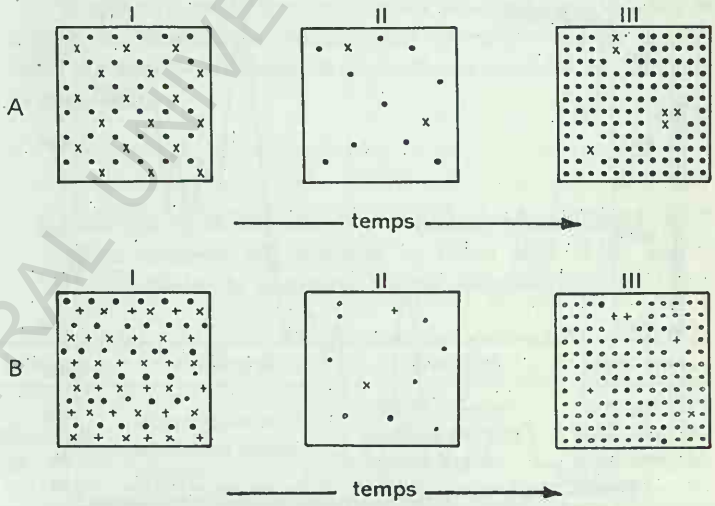


Figure 5.19
Rupture d'équilibre biologique provoquée par des traitements insecticides. En A, par pullulation d'un ravageur (•) à la suite de l'élimination de ses ennemis naturels (x). En B, par multiplication d'un ravageur secondaire normalement inoffensif (o) par suite de la destruction des entomophages qui limitaient ses populations (x). D'après Smith et Van den Bosch in *Kilgore "Pest control", Academic Press, 1967, p. 298-299*

Dans d'autres circonstances, les pratiques "phytosanitaires" vont se traduire par l'apparition d'une nouvelle espèce nuisible à la culture, jusqu'alors rare ou peu commune sur le végétal considéré. Cela peut résulter d'une moindre sensibilité d'un ravageur secondaire B à l'insecticide que celle du principal ennemi de la culture A (Fig. 5.19 B). Dans cette éventualité, l'insecticide va modifier la concurrence interspécifique entre les deux espèces en faveur de B qui va se mettre à pulluler.

Le pesticide peut aussi provoquer un phénomène d'émigration dans la culture de phytophages provenant de zones limitrophes ou d'autres plantes. Supposons qu'un traitement détruise l'espèce A et fasse fuir les prédateurs de celles-ci à l'extérieur de la zone traitée

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

parce qu'ils n'y trouvent plus leur proie. Dans ces conditions, une espèce B peut envahir la place laissée libre et s'y multiplier sans entrave en l'absence d'ennemis naturels (Fig. 5.20). Ici, c'est la rupture de la chaîne trophique qui modifie la concurrence interspécifique entre phytophages.

Il nous serait possible d'illustrer à profusion, par de multiples exemples concrets, les schémas de rupture d'équilibres biologiques évoqués ci-dessus. Nous nous limiterons à quelques cas forts démonstratifs.

On a pu montrer en Californie que l'usage du DDT était la cause essentielle de prolifération d'une cochenille, *Aonidiella aurantii*, qui attaque les *Citrus* ! Cet insecticide détruit non seulement les chalcidiens parasites de cette espèce mais aussi les prédateurs tels les coccinellides et autres ennemis naturels des Coccides (De Bach, Rosen et Kenneth, 1971). L'arrêt du traitement permet de retomber en quelques années au niveau du peuplement *d'Aonidiella* (Fig. 5.21).

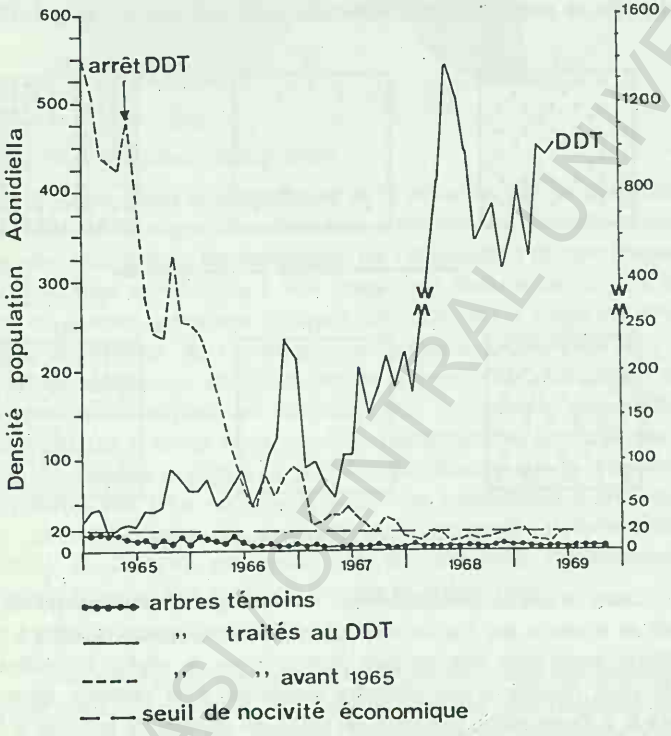
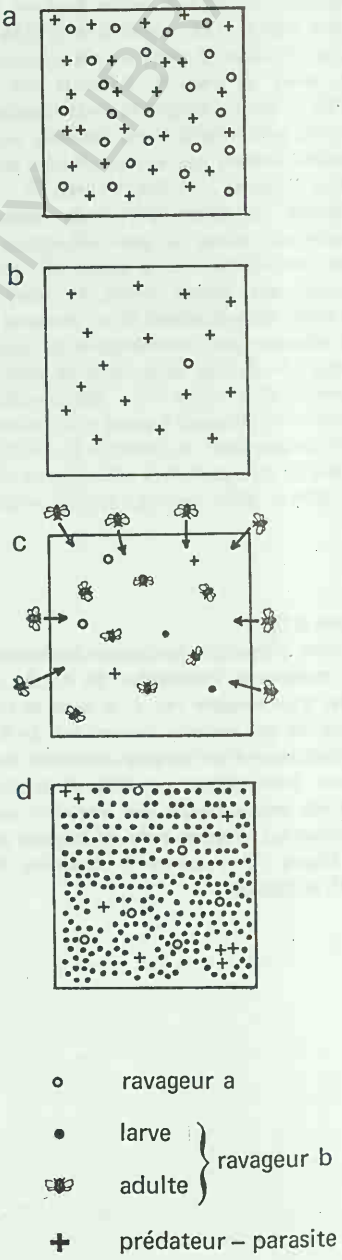


Figure 5.21
Pullulation de la cochenille des agrumes Aonidiella *consécutive à l'usage du DDT. Cet insecte reste au-dessous du seuil de nocivité économique chez les arbres témoins. Le DDT provoque sa multiplication tandis que la suppression de son usage sur des arbres traités par cet insecticide pendant plusieurs années consécutives s'accompagne de la diminution de la densité des populations de cochenilles ! D'après De Bach et coll.* in *Huffaker "Biological control", Plenum Press ed., 1971, p. 189-90*

Figure 5.20
Rupture d'équilibre biologique par suite de l'émigration d'un ravageur secondaire (b) à l'intérieur de la zone traitée. D'après Smith et Van den Bosch in *Kilgore, 1967, p. 324*



QUEENSLAND CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La culture cotonnière apporte aussi une excellente démonstration des effets paradoxaux auxquels peut conduire une lutte chimique menée sans discernement. Aucune législation ne restreint en effet les traitements pesticides sur le coton, végétal cultivé pour la seule production de fibres textiles. La destruction complète de la zoocœnose de prédateurs et parasites qui contrôlaient les populations des divers insectes phytophages du cotonnier a créé une situation catastrophique sur cette culture et la lutte chimique s'y est engagée dans un véritable cercle infernal.

La multiplication des traitements, rendue nécessaire par l'augmentation des dommages, agit en accroissant les déséquilibres biocœnotiques. On en est venu peu à peu à l'adoption de fréquences d'intervention phytosanitaires absolument aberrantes : plus de 40 traitements se réalisent en moyenne chaque année sur le cotonnier aux Etats-Unis ! Avant l'introduction de la lutte intégrée, on effectuait sur cette culture une pulvérisation insecticide tous les trois jours dans la vallée de Cañete au Pérou . . . avec pour seul résultat de faire croître le nombre d'espèces de ravageurs inféodés à cette culture !

Il apparaît que la lutte chimique a provoqué dans la vallée de Cañete un déséquilibre biocœnotique exceptionnel avec doublement du nombre d'espèces de phytophages nuisibles au cotonnier (Tableau XL).

Tableau XL — Modification du complexe biocœnotique des insectes ravageurs du cotonnier au Pérou sous l'effet des traitements pesticides, d'après Boza-Barduci

Période	1943-1949	1949-1956	1957-1965
Nature de la lutte	Métaux lourds et insecticides d'origine végétale	Insecticides organiques de synthèse (surtout organochlorés)	Lutte intégrée (avec usage d'insectes entomophages)
Complexe de ravageurs (principales espèces nuisibles)	*Anthonomus vestitus* *Anomis texana* *Aphis gossypii* *Heliothis virescens* *Mexina peruella* *Hemichionaspis minor* *Dysdercus peruvianus*	*A. vestitus* *A. texana* *A. gossypii* *H. virescens* *M. peruella* *H. minor* *D. peruvianus*	*A. vestitus* *A. texana* *A. gossypii* *H. virescens* *M. peruella* *H. minor* *D. peruvianus*
Nouveaux ravageurs apparus à la suite de la multiplication des traitements insecticides		*Argyrotaenia sphaeleropa* *Platynota sp.* *Pseudoplusia rogationis* *Pococera atramenalis* *Planococcus citri* *Bucculatrix Humberiella*	

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'introduction de la lutte intégrée, laquelle fait entre autres appel aux insectes entomophages, a réduit le nombre de traitements insecticides tout en permettant d'accroître les rendements.

Aux Etats-Unis, l'usage abusif sur le cotonnier d'un insecticide organo-phosphoré, l'azodrin, a aussi conduit à des situations aberrantes. Loin de diminuer l'importance des populations de chenilles des capsules (*Heliothis zea*), l'azodrin, en éliminant les prédateurs et parasites de cette espèce (Fig. 5.22), augmentait les effectifs de ce ravageur et le nombre de capsules attaquées (Van den Bosch et coll, 1969). La figure 5.22 montre que dans les relevés effectués au mois d'octobre, les dommages sont nettement supérieurs dans les parcelles traitées à l'azodrin que dans les témoins n'ayant reçu aucun traitement !

L'usage des pesticides peut aussi favoriser la pullulation d'espèces jusqu'alors inoffensives, soit par modification de la compétition alimentaire entre espèces de biologie voisine, soit par diminution de la pression des prédateurs et parasites. Les travaux de Chaboussou (1965), relatifs aux effets des pratiques phytosanitaires sur les populations d'acariens, apportent une explication nouvelle et fort séduisante des pullulations de diverses espèces de tétranyches, que l'on observe sur de nombreux végétaux cultivés depuis l'introduction des pesticides de synthèse. Cet auteur a démontré que la fécondité (1) et la fertilité de ces acariens augmentaient sous l'effet des traitements. Cela résulte d'une modification nutritionnelle provoquée dans la plante hôte par les insecticides ou les fongicides organiques. Ces substances font apparaître dans la sève des composés bénéfiques pour le phytophage et accroissent le taux d'éléments nutritifs.

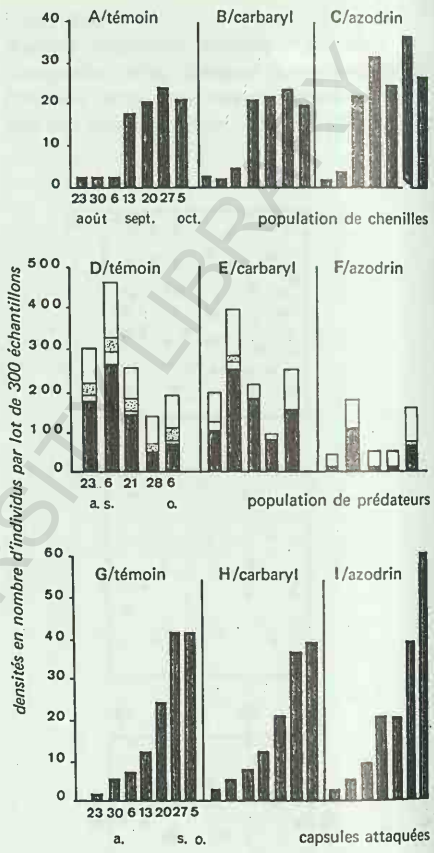


Figure 5.22
Déséquilibres biocœnotiques provoqués par le traitement du cotonnier par l'Azodrin en Californie. Cet insecticide induit un effet paradoxal : son usage fait croître les dégâts causés par la chenille des capsules ! En réalité, cela résulte de la destruction des ennemis naturels de ce déprédateur mis en évidence par le diagramme F. D'après Van den Bosch et coll. in *Huffaker "Biological control", Plenum Press ed., 1971, p. 38*

Effets sur la diversité des biocœnoses

Les herbicides réduisent en général beaucoup la diversité des écosystèmes dans lesquels ils sont introduits. L'exemple des messicoles, déjà cité, est fort démonstratif à cet égard. Aux Etats-Unis, l'usage du 2,4,5 T comme défoliant sur plusieurs millions d'hectares de landes arbustives à *Artemisia tridentata,* afin de les transformer en pacages pour les troupeaux s'est aussi traduit par un bouleversement de cette biocœnose. La disparition des plantes ligneuses s'est accompagnée d'une régression de diverses espèces animales comme le Tetras centrocerque.

Les études expérimentales relatives aux effets des pesticides sur la diversité des biocœnoses sont assez rares. Une des plus précises est celle de Menhinick (1962), dans laquelle cet auteur a comparé le peuplement animal du sol et de l'humus dans des prairies traitées ou non par des insecticides. Les pesticides ont provoqué une diminution de la diversité. Le déclin du nombre d'espèces n'a pas été uniforme dans tous les groupes systématiques, certains ont été plus affectés que d'autres (Tableau XLI). Il est très net dans le cas des espèces de grande taille, en particulier chez les prédateurs. Menhinick relève au total 82 espèces dans les parcelles

(1) Les insecticides peuvent aussi accroître la fécondité et la fertilité des insectes, non par modification favorable de la physiologie de la plante hôte, mais par action directe sur la gamétogénèse. Ainsi, de faibles doses de lindane, qui provoquent 15 % de mortalité accroissent de 50 % la fécondité des femelles survivantes de *Musca domestica L.* (F. Ramade, 1967).

RUSKIN CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

de prairie non traitée, contre 53 seulement dans celles ayant reçu des pesticides. Autre fait intéressant, le nombre d'individus s'est accru, de même que leur densité. Mais cela résulte d'une multiplication des espèces de petite taille, peut-être par suite de la régression de leurs prédateurs. En revanche, la biomasse a nettement diminué dans les parcelles traitées.

Tableau LXI – Effets des pesticides sur la diversité, la densité et la biomasse d'une zoocœnose prairiale.

Catégorie écologique selon le régime	*Diversité*			*Densité*		*Nombre*		*Biomasse*	
	Nombre d'espèces			*Nombre d'espèces dans lesquelles la densité est significativement plus abondante*		*Nombre d'individus par* 3,7 m^2		*Biomasse par* 3,7 m^2 en g	
Parcelles	Traitées	Non traitées	communes aux 2	Traitées	non traitées	Traitées	non traitées	Traitées	non traitées
Phytophages	8	14	8	4	5	3548	2311	11,0	2,0
Saprobies-mycétophages	37	42	27	13	22	94800	15159	146,6	175,6
Prédateurs	14	21	14	2	21	15085	8602	1,2	4,1
Total	59	82	51	17	44	113453	26591	154,0	183,0

* D'après Menhinick (1962).

Effets sur la succession

Comme dans la plupart des cas la succession des populations animales dépend de celle des phytocœnoses, les herbicides affectent plus la succession que les insecticides.

Les herbicides peu sélectifs ont un effet comparable à l'incendie. Ils placent l'écosystème à l'état initial de colonisation par les plantes pionnières.

D'autres herbicides plus sélectifs sont utilisés pour empêcher l'invasion des prairies par des buissons et des arbustes, c'est-à-dire l'évolution de l'écosystème prairial vers un stade plus diversifié, intermédiaire avec la forêt que l'on dénomme *fruticée.* Ils bloquent donc la succession. Remarquons aussi qu'ils diminuent indirectement de ce fait la diversité, car la fruticée est plus riche en espèces végétales que la prairie.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'emploi des pesticides s'accompagne de bien d'autres inconvénients que ceux dont nous venons de parler. Outre les ruptures d'équilibres biologiques dues à l'absence de sélectivité de ces substances et à d'autres particularités précitées, leur toxicité soulève des problèmes d'hygiène publique. La pollution par les pesticides des diverses productions végétales et animales (légumes, fruits, laits, beurre, viandes, etc.) a nécessité l'établissement de niveaux de tolérance : seuils maximaux de résidus admissibles ([1]) dans les produits alimentaires destinés à la consommation humaine. Il est certes exact que ces tolérances sont très sévèrement calculées. Toutefois, les consommateurs souhaiteraient que l'on évite d'incorporer à leur nourriture quotidienne des substances dont on peu tout au moins affirmer qu'elles ne sont pas favorables à leur santé.

Par ailleurs, les pesticides ne détruisent pas seulement les insectes entomophages mais aussi les pollinisateurs également utiles, sinon plus, que ces derniers. Les abeilles et divers autres hyménoptères, des diptères, jouent aussi un rôle indispensable en butinant de nombreuses plantes cultivées dont la pollinisation (donc la récolte) serait inexistante en leur absence.

Enfin, un dernier inconvénient provient de l'apparition de souches résistant aux insecticides. On avait certes observé dès le début du siècle quelques cas de résistances aux insecticides d'origine minérale, mais ce phénomène demeurait fort limité. Avec l'introduction des insecticides de synthèse, dont les molécules organiques souvent complexes présentent des possibilités de dégradation, la résistance a pris une importance considérable. D'abord restreinte à quelques espèces de mouches et de moustiques, elle s'étendit peu à peu à tous les genres d'intérêt économique. En 1961, Brown estimait que 98 espèces vectrices d'affections parasitaires de l'homme et des animaux domestiques et 35 espèces nuisibles aux cultures présentaient une résistance à un ou plusieurs types d'insecticides. En 1966, un rapport de la FAO dénombrait 156 espèces d'insectes phytophages —et des plus redoutables— qui avaient acquis une résistance significative à un ou plusieurs groupes chimiques d'antiparasitaires. Il en existe aujourd'hui plus de 200 (Fig. 5.23). Ce problème revêt une importance d'autant plus considérable qu'une légère augmentation (de 4 à 5 fois) des doses nécessaires pour obtenir un contrôle satisfaisant des populations de ravageurs suffit en bien des cas à compromettre la rentabilité économique des traitements. De plus , en cas d'échecs, les agriculteurs ont souvent tendance à augmenter les doses ou la fréquence des traitements, ce qui accroît inutilement les taux de résidus dans les sols et les végétaux et de ce fait la contamination des productions. Les divers inconvénients que nous venons d'énumérer ont conduit les toxicologues, les diététiciens, les écologistes et un

(1) Les taux établis par l'OMS sont en général inférieurs à la ppm. Ils suffisent cependant pour contaminer le corps humain. L'Américain moyen "titre" 12,9 ppm de DDT dans ses graisses corporelles, le Français, 5,2 ppm, l'Allemand 2,3, l'Anglais 2,2 (Hayes et Dale, 1963).

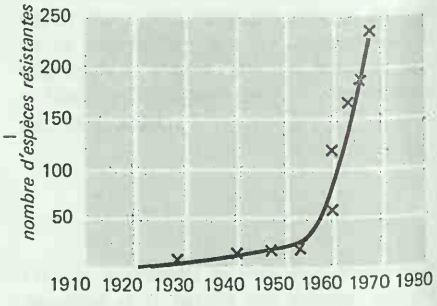


Figure 5.23
Croissance du nombre d'espèces d'arthropodes nuisibles devenues résistantes à une ou plusieurs familles de pesticides. D'après Conway in "Man in the living environment", Wisconsin U P, 1972, p. 120

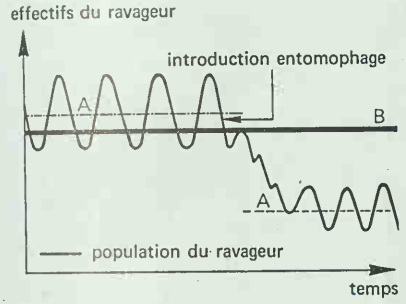


Figure 5.24
Principes de la lutte biologique. L'introduction d'un entomophage fait baisser le niveau moyen des effectifs de la population du ravageur (trait interrompu A) au-dessous du seuil de nocivité économique (B). D'après Smith et Van den Bosch in *Kilgore "Pest control", Acad. Press, 1967, p. 320.*

nombre croissant d'agronomes à souhaiter la mise au point de nouvelles méthodes de lutte qui éviteraient la contamination de l'environnement par les substances biocides au spectre d'action trop étendu.

Le but que se propose d'atteindre la lutte biologique s'appuie sur le principe fondamental suivant : rechercher par tous les moyens à faire décroître pour chaque espèce de ravageur présente dans un agroécosystème ou tout autre milieu, le coefficient intrinsèque d'accroissement naturel, afin que le niveau moyen des effectifs du nuisible soit au-dessous du seuil de nocivité économique (Fig. 5.24).

Ce résultat peut être obtenu par accroissement du coefficient de mortalité, en faisant baisser le coefficient de natalité, soit encore par action conjuguée sur ces deux facteurs.

Méthodes qui influencent la mortalité

Ces méthodes se proposent d'accroître le taux de mortalité du ravageur à l'aide des ennemis naturels de celui-ci, prédateurs et parasites. Dans les conditions naturelles, beaucoup d'espèces d'insectes, d'acariens ainsi que des mycoses interviennent pour limiter les populations d'invertébrés terrestres. Chacune contribue dans une proportion minime, souvent de 1 à 5 %, à réduire les effectifs de l'insecte ravageur. La mortalité cumulée de ces divers facteurs limitants biotiques et des facteurs abiotiques atteint en général ou dépasse 90 %. Dans le cas d'une espèce où la mortalité est en moyenne de 98 % par exemple, on concevra qu'une seule diminution de 2 % doublera le nombre de géniteurs et provoquera une explosion de population. A l'inverse, si l'introduction d'un nouveau parasite accroît seulement de 1 % son taux de mortalité, la population du ravageur régressera beaucoup.

Historiquement, c'est à une telle méthode que l'on eut d'abord recours. Dès 1888, le célèbre entomologiste Riley, le pionnier de la lutte biologique, résolut ainsi de façon magistrale le problème de la cochenille australienne, *Icerya purchasi*, par l'importation en Californie d'un de ses ennemis naturels, la coccinelle *Novius cardinalis*.

De très nombreuses introductions d'entomophages furent réalisées depuis lors en diverses régions du monde et donnèrent souvent des résultats inespérés. De Bach (1964) cite 160 cas où cette méthode a réussi, dont 24 réglèrent le problème de façon irrévocable et ne demandèrent plus aucune intervention humaine par la suite.

Il est parfois arrivé que l'espèce ou les diverses espèces d'entomophages ne se soient pas acclimatées : l'échec de l'introduction de divers ennemis naturels du doryphore en constitue un des exemples les plus irritants.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Mais il serait cependant erroné de considérer que toutes les possibilités de la méthode aient été épuisées. Par ailleurs, si l'introduction d'insectes utiles d'un continent à l'autre constitue la forme la plus connue de lutte biologique, il en existe bien d'autres qui font appel, également, aux entomophages. On peut aussi utiliser des espèces autochtones dont on réalise des lâchers périodiques. Cela présuppose la connaissance de techniques permettant au préalable leur multiplication en masse.

En France, ces méthodes de lutte biologique fondées sur l'emploi d'insectes prédateurs ou parasites ont donné, au cours de la dernière décennie, quelques succès spectaculaires.

Le mérite en revient au département de Zoologie de l'INRA qui, sous l'impulsion de Biliotti, dont il faut louer les efforts opiniâtres pour faire adopter aux milieux agronomiques français de nouvelles conceptions plus modernes sur la défense des cultures, a fait connaître un renouveau à la lutte biologique dans notre pays.

Parmi les nombreux travaux réalisés en ce domaine, nous citerons, au hasard, la réussite de l'acclimatation par Benassy et ses collègues (1968) à la station d'Antibes, d'un hyménoptère chalcidien, *Prospatella perniciosi* sur le redoutable pou de San Jose, *Quadraspidiotus perniciosus.*

Yperti (1966 et suivants) a réussi dans le même laboratoire le contrôle d'une autre cochenille *(Parlatoria blanchardii)* nuisible au palmier-dattier par acclimatation d'une coccinelle *(Chilocorus bipustulatus).*

Toujours à la station d'Antibes, fut mis au point par Delanoue un milieu d'élevage artificiel du braconide *Opius concolor* lequel a permis de lutter contre la mouche de l'olive *Dacus oleae,* dans des conditions de rentabilité supérieures à celle des insecticides classiques.

Aujourd'hui, en divers pays de nombreuses équipes s'efforcent de mettre au point de telles méthodes d'élevage d'insectes entomophages à l'échelle industrielle.

De grands espoirs sont fondés sur le recours aux espèces qui s'attaquent aux œufs. Diverses particularités confèrent en ce domaine un exceptionnel intérêt aux insectes oophages. Outre leur potentiel biotique élevé, car la polyembryonie est de règle chez ces hyménoptères endoparasites, leur faible taille (en général inférieure au mm), permet d'obtenir des nombres considérables d'individus sous de très faibles volumes donc à partir d'installations modestes. Enfin, leur principale supériorité sur les autres entomophages réside en ce qu'elles parasitent les œufs et arrêtent *ipso facto* les pullulations de leurs hôtes phytophages avant même qu'ils n'aient commencé à exercer leurs méfaits. En URSS, la production au stade industriel de *Tichogramma,* minuscules chalcidiens oophages, permet de traiter chaque année quelque 5 millions d'hectares de céréales (selon Biliotti, 1970).

Planche XVII

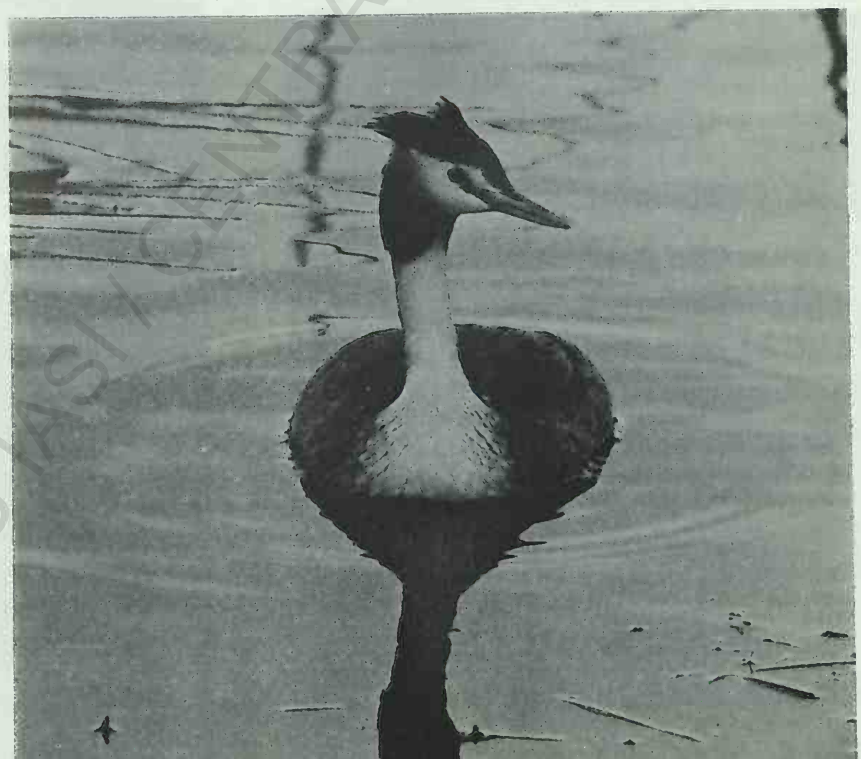
1) Le faucon pélerin (Falco peregrinus), *a considérablement régressé au cours de la dernière décennie tant en Europe qu'en Amérique du Nord, par suite de la pollution systématique des écosystèmes continentaux par les insecticides organo-chlorés.*
(Cliché M. Brossolin)

2) Grèbe huppé (Podiceps cristatus)
Les oiseaux de la famille des Podicipidae sont situés au sommet d'une longue chaîne trophique, puisque leur régime est strictement ichtyophage. Aussi les grèbes sont-ils particulièrement exposés à la pollution des écosystèmes limniques par les pesticides persistants.
(Cliché P. Vallée)

SOUTH CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

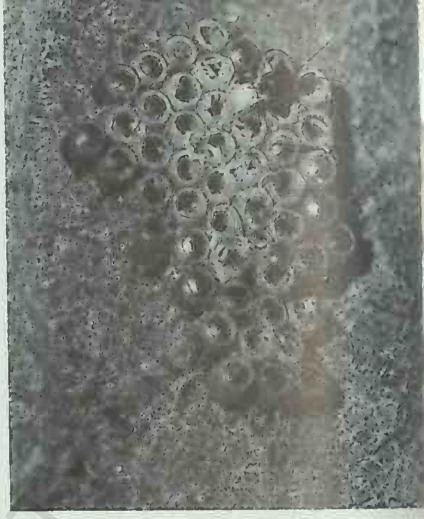
1

2



BCU IASI / CENTRALA

1



3

4

5

2

Dans un second temps, la lutte biologique s'est intéressée à la mise en œuvre des microorganismes pathogènes contre les insectes nuisibles.

La guerre microbiologique constitue sans conteste une méthode fort séduisante pour augmenter sans grande peine le taux de mortalité des ravageurs. Le propre d'une épidémie réside en son pouvoir d'autodispersion, de réaction en chaîne en quelque sorte, qui lui permet d'atteindre des individus situés bien au-delà de la zone initialement contaminée.

On a tout d'abord envisagé le recours à des champignons entomophages agents de mycoses et à des bactéries entomopathogènes.

Les recherches entreprises à la station de la Minière sous la direction de Hurpin et Feron ont montré que les *Fungi imperfecti* des genres *Beauveria* et *Metarhizium* pourraient permettre un contrôle efficace des coléoptères scarabaeides à larves terricoles.

Bien qu'il ait été décrit pour la première fois en 1913, il a fallu attendre jusqu'au début des années 50 pour que l'on envisage l'emploi du *Bacillus thuringiensis* dans la lutte biologique. L'INRA a joué un grand rôle dans le développement de la bactospéine, premier insecticide bactérien commercialisé par Rhône-Poulenc. Ces travaux, réalisés à la station de la Minière par Grison, Martouret, Burgergon et leurs collaborateurs, ont permis la mise au point d'une préparation de spores bactériennes qui a donné des résultats spectaculaires dans le contrôle de diverses chenilles polyphages.

Plus récemment, de nombreuses équipes de chercheurs ont porté leur attention sur les virus d'insectes.

En France, voici déjà quelques années, Biliotti et ses collaborateurs avaient donné une démonstration convaincante du parti que l'on pouvait tirer de l'emploi des virus dans la lutte biologique. Dès la fin des années 50, au Mont Ventoux, l'utilisation du *Smithiavirus pithyocampae,* agent d'une polyédrie cytoplasmique intestinale des chenilles de lépidoptères, leur avait permis de stopper une pullulation de processionnaires du pin qui affectait un boisement de plusieurs milliers d'hectares.

Faut-il insister sur le fait que la spécificité de certains microorganismes les empêche de provoquer dans les biocœnoses des bouleversements semblables à ceux induits par les toxiques biocides ?

Aux esprits chagrins qui objectent l'impossibilité pour l'homme de déclencher et de contrôler une épidémie, et contestent ainsi la possibilité de recourir de façon usuelle à de telles méthodes, nous ferons remarquer que l'on connaît au moins une espèce de ravageur contre laquelle leur emploi a permis un succès spectaculaire : il s'agit du lapin. Ce rongeur a été introduit en 1859 en Australie où il devint rapidement un véritable fléau. Même en Europe occidentale, il était considéré comme nuisible jusqu'en 1952.

Planche XVIII
Lutte biologique (Clichés F. Ramade).
1) Cochenilles australiennes (Pericerya purchasi) *adultes et larves. Cette espèce fut introduite accidentellement à la fin du siècle dernier d'Australie en Amérique du Nord, puis dans la région méditerranéenne, où elle fit des ravages dans les plantations d'agrumes. Elle en fut éliminée par l'importation sur les continents américains et européens d'un de ses prédateurs naturels, la coccinelle* (Novius cardinalis).
2) Coccinella 7-punctata. *Ces coléoptères se nourrissent de pucerons ou de cochenilles, tant à l'état larvaire qu'à l'état adulte. Ils ont donné lieu à de nombreuses tentatives réussies de lutte biologique.*
3) Chalcidien venant d'éclore d'une ponte d'Altise de la vigne. Ces petits hyménoptères se développent en parasites oophages. Leur usage a conduit à des résultats fort prometteurs dans la lutte contre certains déprédateurs comme le redoutable Eurygaster integriceps *qui fait des ravages dans les cultures de céréales en Europe orientale et en Asie Centrale.*
4) Tachinaire du genre Echinomyia. *Ces Diptères parasitent diverses espèces d'insectes, en particulier des chenilles de Lépidoptères.*
5) Rhyssa *sp. Ichneumonide parasite des Hyménoptères xylophages du genre* Urocerus. *Femelle en train de pondre : elle insère sa longue tarière au travers d'une fente du tronc afin d'atteindre la larve de son hôte dans laquelle elle dépose un œuf.*

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'introduction clandestine en France, cette année-là, du virus de Sanarelli, agent de la myxomatose, fut réalisée par un ingénieur agronome de l'Eure-et-Loir, excédé par les dégradations causées aux récoltes de sa propriété par cette espèce prolifique. Il s'ensuivit une épidémie foudroyante qui s'étendit à tout le territoire national et au-delà, faisant s'effondrer de 99 % au moins les populations de lapins de notre pays. En Australie, où cette affection avait été introduite à partir de 1936, et surtout pendant la seconde guerre mondiale, les effectifs ont décrû de façon significative, ce qui a permis la reprise du couvert végétal très dégradé en certaines régions et l'extension de l'élevage à des zones improductives par suite de la trop forte densité du peuplement de lapins qu'elles supportaient. (Fenner et Ratcliffe, 1965).

Méthodes qui affectent la natalité

Depuis une décennie, se sont peu à peu dessinées des voies nouvelles pour la lutte biologique. A l'opposé des méthodes précédentes, dont l'objet est d'accroître la mortalité, ces dernières ont pour but de diminuer le coefficient de natalité des espèces indésirables.

La lutte autocide constitue une remarquable application de ce principe. Le premier succès à mettre à son actif est déjà assez ancien. Dès 1954, Knippling avait réalisé des lâchers de mâles de *Cochliomyia hominivorax* préalablement stérilisés au Co^{60} dans l'île de Curaçao, ce qui lui avait permis d'éliminer totalement de celle-ci ce diptère, agent de redoutables myiases. Par la suite, la même opération, étendue aux Etats riverains du golfe du Mexique, a permis son éradication complète du territoire des USA et accru de 10 millions de dollars les bénéfices de l'élevage dans ces régions.

Cette technique se fonde sur le principe selon lequel un individu stérile répand son infécondité dans la population car il induit celle de son partenaire. Dans le cas de *Cochliomyia,* le succès de l'opération fut facilité par le fait que les femelles ne s'accouplent qu'une seule fois dans leur existence.

Toutefois, la réussite de la méthode présuppose la mise au point d'élevages de masse et de techniques d'irradiation qui stérilisent les mâles sans atténuer leur vigueur physiologique et en particulier leur agressivité sexuelle.

La lutte autocide par usage des radiations ionisantes soulève, malgré tout, des difficultés insurmontables lorsqu'il s'agit d'espèces aux populations naturelles trop importantes. Aussi a-t-on songé à mettre au point des substances chimiostérilisantes qui permettraient d'arriver aux mêmes résultats à moindre frais. Kilgore (1967) a publié une excellente monographie sur ces nouveaux composés. Certains d'entre eux bloquent les cinèses goniales, d'autres entravent la synthèse des substances indispensables aux gamètes, perturbent la spermiogénèse et la vitellogénèse. Une troisième

BOUVIA STATE UNIVERSITY LIBRARY

catégorie de chimiostérilisants renferme diverses substances dites radiomimétiques. Celles-ci agissent comme les radiations ionisantes et induisent des mutations léthales dans les gamètes qui rendent les accouplements infertiles par production de zygotes non viables.

Malgré leur toxicité importante pour les vertébrés, on attend beaucoup de ces composés par combinaison de leur emploi avec celui d'attractifs sexuels ou alimentaires, qu'ils soient naturels ou synthétiques.

Les progrès récents accomplis dans la connaissance des phéromones et la découverte de substances attractives de puissance stupéfiante autorisent les plus grands espoirs en ce domaine. Jacobson (1965) citait déjà plusieurs dizaines de substances agissant comme attractif sexuel, alimentaire ou intervenant dans le comportement social de divers insectes : marquage de pistes, signaux d'alarme, etc.

La réalisation de pièges avec ces attractifs s'avère fort prometteuse et peut conduire à des résultats spectaculaires. Ainsi, dès 1960, Jacobson avait isolé un composé aliphatique, le *Giplure* — phéromone sexuelle de *Lymantria dispar,* capable d'attirer les mâles de cette espèce à une concentration de 10^{-9} μg par m^3 d'air ! A la même époque, l'association d'un autre attractif sexuel, le trimedlure, à un puissant ester phosphorique, avait permis de fabriquer des pièges grâce auxquels fut réalisée l'éradication totale de la mouche méditerranéenne des fruits qui venait d'être introduite en Floride. La fabrication de pièges renfermant un composé attractif associé à un chimiostérilisant résout aussi de façon élégante le problème des risques de contamination de l'environnement par des composés toxiques.

On pourrait toutefois se demander pourquoi la combinaison attractif-chimio-stérilisant est préférable à celle attractif-insecticide. Son intérêt réside précisément en ce que les chimiostérilisants ne tuent pas les insectes qui les absorbent. Le tableau XLII compare les effets d'un traitement insecticide donnant 90 % de stérilité. Les calculs sont faits dans le cas où les générations ne se chevauchent pas et où le potentiel biotique correspond à $r = 5$ (cf. chap. II, p. 115), c'est-à-dire qu'il y a 5 descendants par individu de la génération précédente. On suppose aussi que la fécondité des individus survivant au traitement insecticide n'est pas affectée par l'intoxication.

L'examen de ces chiffres montre qu'avec l'insecticide, 10 % des survivants restent féconds et donneront une descendance de 500 000 individus. Le traitement n'aura diminué que de moitié les effectifs de la génération suivante par rapport à ceux de la population initiale. Au contraire, dans les cas d'une chimiostérilisation efficace sur 90 % des individus, les 10 % de femelles demeurant fécondes n'auront qu'une chance sur dix de s'accoupler avec

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

un mâle fécond, de sorte que le chimiostérilisant présentera un effet comparable à un traitement insecticide provoquant 99 % de mortalité. On conçoit donc que la lutte autocide par chimiostérilisation s'avère nettement plus efficace que les insecticides et qu'elle est préférable aux lâchers de mâles stériles car elle agit sur les deux sexes. En outre, elle possède l'avantage d'exercer son action même au-delà des zones traitées puisque les insectes conservent une activité normale de vol.

Une autre manière d'abaisser le coefficient de natalité d'un arthropode, voire d'augmenter son taux de mortalité naturelle, consiste à perturber son développement post-embryonnaire.

Les progrès effectués depuis une dizaine d'années dans le domaine de l'endocrinologie des insectes autorisent les plus grands espoirs en ce sens et conduisent à envisager l'emploi d'hormones dans la lutte biologique.

Tableau XLII — Comparaison des effets démoécologiques d'un traitement insecticide et chimiostérilisant de même intensité (*)

Génération	*Aucun traitement*	*Traitement insecticide donnant 90 % de mortalité*	*Chimiostérilisation donnant 90 % de stérilité*
Parents	1 000 000	1 000 000	1 000 000
1ère	5 000 000	500 000	50 000
2ème	25 000 000	250 000	2 500
3ème	125 000 000	125 000	125
4ème	125 000 000	62 500	6
5ème	125 000 000	31 250	0

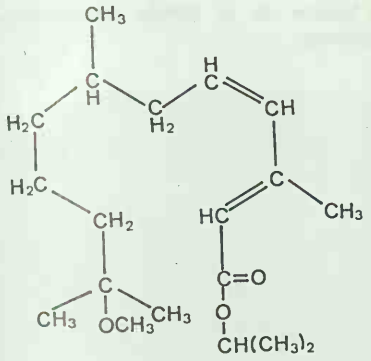
* $r = 5$, $K = 125 \times 10^6$.

Dans une récente mise au point (1972), Joly a remarquablement exposé l'état actuel des connaissances sur l'hormone de mue, l'ecdysone, et sur l'hormone juvénile ou néoténine. Celles-ci jouent un rôle essentiel dans le contrôle du développement postembryonnaire et régissent le mécanisme complexe des mues, des métamorphoses et de la maturation sexuelle.

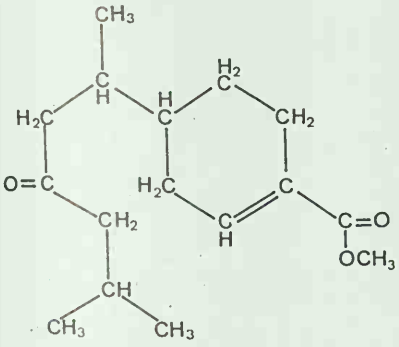
On concevra sans peine que l'administration intempestive de néoténine à un moment inopportun du cycle vital d'un insecte puisse compromettre sa croissance et sa reproduction.

L'hormone juvénile présente par ailleurs de remarquables particularités : elle est hautement spécifique des insectes, seuls organismes qui la synthétisent, n'est toxique pour aucun animal et agit par simple contact. La résistance à ce composé, indispensable à la physiologie normale des insectes, paraît de plus difficile à acquérir.

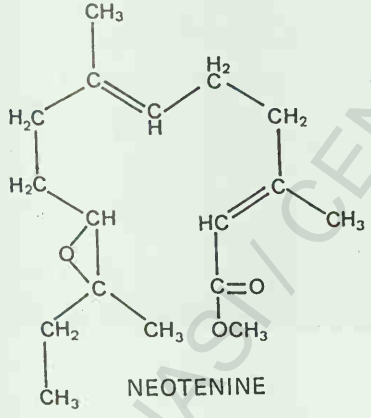
BUNDESZENTRALE UNIVERSITY LIBRARY



ENTOCON E



JUVABIONE



NEOTENINE

Figure 5.25
Formule chimique de la Néoténine et de ses homologues : la juvabione (substance naturelle) et un Entocon (substance synthétique). D'après divers auteurs in *Ramade ; bull. Soc. Zool. France, 1972 (1973), n° 4.*

La synthèse stéréosélective de la néoténine a été réalisée séparément par Corey et Johnson, en 1968, dans leurs laboratoires respectifs. Depuis, divers firmes et laboratoires de recherches se sont lancés dans des investigations sur les hormones naturelles d'insectes ou sur l'isolement d'homologues synthétiques de ces substances.

La découverte du *paper factor* par Slamà, la séparation par Bowers en 1966 de son principe actif, la juvabione, ont aussi constitué des acquis fondamentaux pour la recherche de nouvelles alternatives à la lutte chimique.

L'histoire du *paper factor* est fort édifiante. Slamà se rendit en 1965 à l'Université de Harvard pour faire un stage dans le laboratoire de Williams. Il amenait avec lui une punaise commune dans la région paléarctique, *Pyrrhocoris apterus.* Il constata qu'aux Etats-Unis ces insectes, qu'il élevait sans difficulté en Europe, n'arrivaient pas à passer au stade adulte et donnaient à leur mue imaginale des superlarves géantes mais stériles. Après bien des investigations infructueuses, il put attribuer ces anomalies de développement au contact des insectes avec le papier filtre qu'il disposait au fond des cages d'élevage. Son remplacement par des feuilles de divers journaux américains ne modifiait pas la situation, seules les éditions européennes de ces mêmes publications permettaient un développement normal des insectes. Selon toute évidence, ces anomalies résultaient de la présence dans les pâtes à papier américaines, lesquelles proviennent du bois du sapin beaumier, *Abies balsamea,* d'un mystérieux principe actif que Slama dénomma *paper factor.*

Son isolement par l'équipe de Bowers montra qu'il s'agissait d'un sesquiterpène monocyclique de structure proche de l'hormone juvénile. Malgré son analogie structurale avec la noéténine, cette substance, qui fut dénommée *juvabione,* est hautement spécifique des hétéroptères pyrrhocorides. Elle n'agit pas sur la famille des lygaeides, pourtant très voisines de la précédente.

La découverte d'homologues naturels ou synthétiques de la néoténine spécifiques de quelques familles d'insectes, sinon d'une seule, présente le plus haut intérêt. Par suite de l'étroitesse de leur spectre d'action, elles ne peuvent modifier ou rompre les équilibres biologiques, à l'opposé de ce que provoque l'usage des biocides dans la lutte chimique classique.

Diverses firmes industrielles de rang international, se sont attachées depuis peu de temps à synthétiser des substances homologues d'hormones d'insectes. Aux Etats-Unis, la nouvelle firme Zoecon qui s'est fixé de tels objectifs est prête à diffuser sur le marché des homologues de la noéténine sous le nom d'entocon. Plusieurs de ces composés sont déjà au stade de l'expérimentation en plein air. L'entocon E (Fig. 5.25) dont la commercialisation

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

serait imminente présente une intense activité sur les Culicides (*), en particulier divers *Aedes,* moustiques chez lesquels la résistance aux insecticides est quasiment générale.

Notons enfin que ces substances agissent non seulement par stérilisation des insectes mais provoquent aussi une forte mortalité aux stades préimaginaux. La néoténine perturbe aussi le développement embryonnaire et empêche l'éclosion des œufs. Elle induit une forte mortalité au moment de la dernière mue car les larves géantes s'extraient avec les plus grandes difficultés de leur exsurvie et meurent souvent avant d'avoir réussi à s'en dégager.

La lutte biologique peut aussi être mise en œuvre contre les mauvaises herbes et autres plantes indésirables.

L'introduction en Australie des cactus (*Opuntia* sp.) s'est accompagnée de la prolifération de cette plante sur une surface équivalente à celle cultivée en blé sur ce continent, c'est-à-dire des millions d'hectares. L'importation d'Argentine, au début des années 30, d'un papillon *Cactoblastis cactorum,* dont les chenilles creusent des galeries dans les cladodes d'*Opuntia,* élimina en peu de temps la quasi-totalité des cactus indésirables. De même, l'importation d'Europe en Nouvelle-Zélande de plusieurs espèces d'insectes dont *Chrysomela hyperici* a permis de résoudre en quelques années le problème du millepertuis. Cette plante avait été accidentellement introduite dans ce pays et envahissait peu à peu tous les pâturages. L'introduction d'insectes phytophages qui lui sont inféodés a mis un terme à son invasion.

(*) Insectes de la famille des moustiques (Culicides).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE VI

Chapitre VI — Pollution des eaux continentales et océaniques 325

Nature et importance de la pollution des eaux 327
La pollution biologique des eaux 330
Pollution chimique des eaux 332
Plomb 332
Mercure 333
Nitrates 334
Phosphates 335
Hydrocarbures 335
Pollution par les substances organiques de synthèse 338
Les détersifs 338
Les pesticides 339
Polychlorobiphényles (PCB) 341
Autres substances organiques de synthèse 343
Altérations physiques de l'hydrosphère 344
Matériaux insolubles 344

Conséquences écologiques de la pollution des eaux 345
Effets de la pollution organique 345
Pollution organique en milieu lentique : l'eutrophisation des lacs 352
Effets de la pollution chimique des eaux 365
Conséquences biocœnotiques de la pollution chimique des eaux 369
Hydrocarbures 369
Pesticides 375
Mercure 378
Pollution thermique des eaux 387
Cause et importance 387
Conséquences 390

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

VI
LA POLLUTION DES EAUX CONTINENTALES ET OCEANIQUES

Le problème de la pollution des eaux représente sans aucun doute un des aspects les plus inquiétants de la dégradation du milieu naturel par la civilisation contemporaine. Si, à de rares exceptions près, l'ensemble des phénomènes de pollution que nous venons d'étudier constituent une menace potentielle susceptible d'entraver à plus ou moins brève échéance l'activité humaine, la contamination des eaux continentales et océaniques est un problème actuel. La crise de l'eau sévit déjà, elle affecte aussi bien les pays industrialisés et les mers qui les entourent que bien des régions du tiers monde à climat aride où la production agricole voit son expansion limitée par le manque d'eau.

Les mécanismes et les effets de la pollution des eaux figurent paradoxalement parmi les mieux connus de toutes les nuisances. La nature des agents polluants, leur mode d'action biologique ont donné lieu à de très nombreux travaux. La recherche de méthodes efficaces a conduit à des solutions satisfaisantes dans la plupart des cas, aussi bien sur le plan technique qu'économique. Cependant, le sujet est encore plus compliqué que celui de la pollution atmosphérique dans la mesure où de très nombreuses substances solides peuvent se dissoudre dans l'eau ou être mises en suspension et entraînées fort loin des zones où elles ont été émises. Par suite de cette homogénéité du milieu aquatique, les contaminants introduits dans les eaux vont exercer leur action sur tous les organismes situés en aval et parfois même en mer dans les zones littorales et pélagiques.

Un autre problème spécifique de la pollution des eaux réside dans leur relative pauvreté en oxygène dissous. Alors que les atmosphères les plus polluées renferment, à de rares exceptions près, une concentration en oxygène de valeur quasiment identique à la normale, il en va tout autrement de l'eau.

Le tableau XLIII A figure le taux de saturation de l'oxygène dans l'eau à diverses températures.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XLIII A – Quantité d'oxygène dissous à saturation dans un litre d'eau sous la pression normale (d'après divers auteurs, dans Dajoz)

*Dans une eau de mer** à 20 % de ClNa en cm^3 d'O_2 par litre	*Dans l'eau douce* en cm^3/l	en mg/l	*Température* (en °C)
7,97	10,244	14,16	0°
7,07	8,979	12,37	5°
6,35	7,96	10,92	10°
5,79	7,15	9,76	15°
5,31	6,50	8,84	20°
4,86	5,95	8,11	25°
4,46	5,48	7,53	30°

* Mer Baltique en l'occurence.

Il apparaît que les quantités d'oxygène dissous dans l'eau sont assez faibles aux températures ordinaires. Fait important, le taux d'oxygène décroît avec la température, et il est beaucoup plus faible en mer qu'en eau douce à température égale.

Ce sont les mers froides qui présentent par ailleurs les plus fortes oxygénations. On constate d'autre part une décroissance du taux d'oxygène dissous jusqu'à une certaine profondeur en milieu océanique. La mer Noire constitue un cas extrême : elle renferme des eaux entièrement dépourvues d'oxygène à partir de 200 mètres de profondeur. L'oxygène constitue en définitive un facteur limitant pour la plupart des organismes, tant dans les eaux douces qu'océaniques.

De cette relative rareté de l'oxygène en milieu aquatique découlent deux importants corollaires :

– les animaux dulçaquicoles et marins ont besoin, pour respirer, de réaliser une circulation branchiale extrêmement intense qui assure le contact des branchies avec les énormes volumes d'eau nécessaires afin d'en extraire assez d'oxygène. Ceci accroît d'autant les risques d'absorption de quantités mortelles de tel ou tel polluant chimique ;

– les animaux aquatiques peuvent manquer d'oxygène si pour une raison quelconque, naturelle ou artificielle, la température de l'eau s'élève de façon trop importante. C'est par exemple le cas pendant la période estivale, où les fortes températures ambiantes se conjuguent au faible débit des fleuves pour faire décroître le taux d'oxygène dissous dans leurs eaux à l'étiage.

Un dernier caractère fondamental, spécifique du milieu aquatique, réside dans les faibles fluctuations thermiques qu'il présente au cours du cycle annuel et *a fortiori* pendant une période de plus courte durée.

En effet, l'eau possède un ensemble de propriétés physiques qui concourent à minimiser les changements de température : forte chaleur spécifique, fortes chaleurs latentes de fusion et d'évaporation, maximum de densité à 4° C.

SOAS/GERRARD UNIVERSITY LIBRARY

Aussi, à l'opposé des habitats terrestres où l'air subit des variations thermiques de très forte amplitude au cours d'une même journée, le milieu aquatique ne présente que de faibles fluctuations saisonnières de température. Cependant, la température constitue un facteur limitant dans les eaux continentales ou océaniques, car la plupart des organismes qui y vivent sont sténothermes, c'est-à-dire possèdent une très faible tolérance aux fluctuations thermiques. Aussi, de faibles changements de température peuvent exercer une influence catastrophique sur les biocœnoses aquatiques. En ce sens, la pollution thermique due au rejet d'eaux chaudes, produites par les centrales électriques, dans les rivières (caléfaction (*)) constitue un problème d'environnement des plus préoccupants à l'heure actuelle.

(*) Terme utilisé pour désigner la pollution thermique.

NATURE ET IMPORTANCE DE LA POLLUTION DES EAUX

Au cours des années 60, la pollution des eaux, tant continentales qu'océaniques, s'est accrue à un rythme inquiétant. Les "progrès" de cette pollution reflètent fidèlement ceux de la croissance industrielle. L'histoire de la Grande-Bretagne est riche d'exemples à cet égard. Au début du XIX^{e} siècle, la Tamise était un fleuve propre et certains écrits précisent que l'on pouvait y capturer sans peine des saumons. Elle était déjà devenue un égout à ciel ouvert au milieu de ce même siècle. Il est d'ailleurs possible que le maximum de contamination des cours d'eau britanniques ait été atteint à cette époque, avant que ne soient prises de sévères mesures conservatrices.

Comme la France dispose d'un territoire plus étendu, d'une industrie plus dispersée et de vastes cours d'eau, l'acuité du problème fut pendant longtemps moindre dans notre pays que chez nos puissants voisins industriels. Cependant, le mal n'a pas tardé à se manifester, puis à s'étendre chez nous aussi.

Ainsi, les Parisiens utilisèrent comme eau de boisson celle puisée dans la Seine jusqu'à la fin du XVIII^{e} siècle (Furon, 1962)... Depuis, les temps ont bien changé : non seulement les grands fleuves mais certaines nappes phréatiques sont aujourd'hui contaminées au point d'être impropres aux usages domestiques et parfois même industriels ou agricoles.

Actuellement, la Seine reçoit plus de $1{,}4 \times 10^{6}$ m^{3} par jour d'effluents urbains et industriels, alors que son débit moyen est de 4×10^{6} m^{3}/jour. Aussi a-t-on pu écrire qu'en été, à l'étiage, elle roule pour moitié des eaux d'égout et pour moitié des eaux fluviales ! En 1968, seulement 13 % de la population urbaine française disposait d'une station d'épuration (1) et il n'y avait guère que le tiers des 24 plus grandes villes de notre pays qui traitaient partiellement leurs eaux usées (Colas, 1968). En 1971, à

(1) Pour 30 millions de personnes qui vivent dans des villes de plus de 3 000 habitants.

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

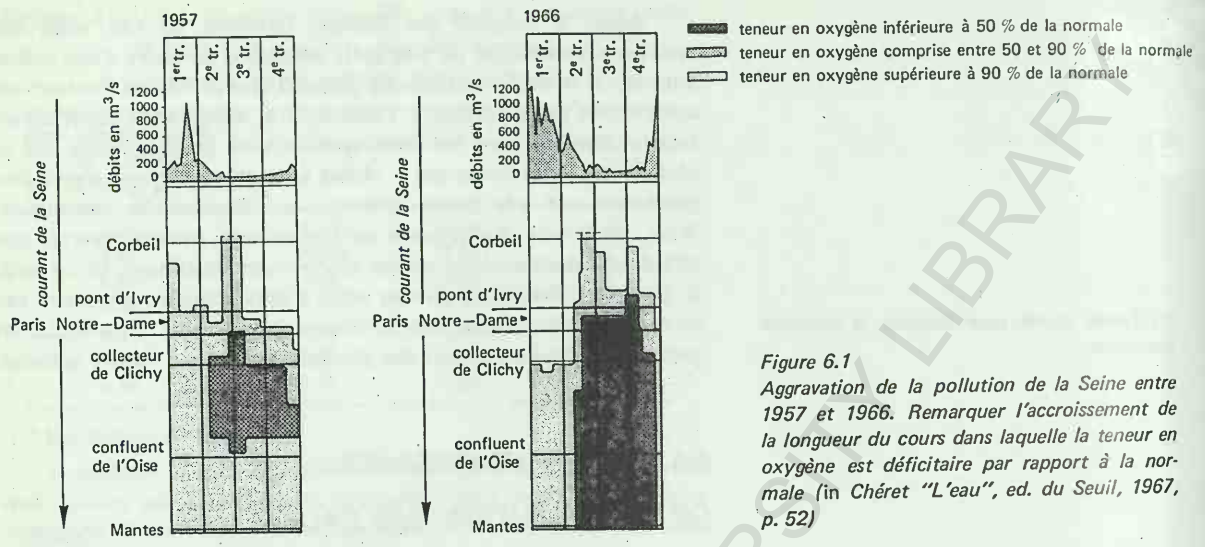


Figure 6.1
Aggravation de la pollution de la Seine entre 1957 et 1966. Remarquer l'accroissement de la longueur du cours dans laquelle la teneur en oxygène est déficitaire par rapport à la normale (in Chéret "L'eau", ed. du Seuil, 1967, p. 52)

peine 20 % des eaux résiduaires urbaines et industrielles étaient épurées en France et un peu plus de la moitié de celles produites par l'agglomération parisienne [1], (fig. 6.1).

On ne peut s'étonner, dans ces conditions, de la pollution permanente de tous les grands bassins fluviaux de notre pays, qui constituent 84 % de la surface totale des eaux libres continentales. Plus de 5 000 km de nos cours d'eaux sont ainsi pollués de façon chronique (fig. 6.2).

Tel est le cas de toutes les rivières du Nord, de la Meuse, de la Sarre et du Rhin. On constate d'ailleurs que la contamination de ce dernier fleuve international croît tout au long de son cours.

Du coté français, il reçoit les résidus d'extraction des mines de potasse d'Alsace, lesquelles rejettent chaque jour 18 à 20 000 tonnes de NaCl sous forme de saumures concentrées [2], soit plus de 7×10^6 tonnes de sel par an. Ceci entraîne quelques difficultés avec les Etats riverains, en particulier la Hollande, laquelle a reproché à notre pays de ne pas s'être associé à l'accord germano-hollandais signé le 17 février 1972 sur la protection des eaux du Rhin.

La pollution des cours d'eau en France est aussi très forte dans tout le bassin de la Seine à partir de Sens (Basse-Oise et Basse-Marne incluses), dans celui du Rhône sur la totalité de son cours, ainsi que dans la Saône et l'Isère. La Loire et la Garonne sont moins fortement contaminées. Cependant, la première présente une très forte pollution dans les régions industrielles riveraines du centre, ainsi que ses affluents : Allier, Creuse et Nièvre, et dans son estuaire à partir de Saint-Nazaire. La Garonne est victime d'une contamination chronique importante dans la région de Toulouse, et dans la Gironde par suite des rejets de l'agglomération bordelaise.

(1) En Suède, 80 % des eaux résiduaires urbaines étaient épurées en 1970, 98 % seront l'objet d'un traitement en 1975, dont 50 % pouvant être recyclables (d'après Barde et Garnier, 1971).

(2) Il est assez surprenant que les Potasses d'Alsace ne puissent apparemment pas extraire ni commercialiser le sel des saumures concentrées qu'elles rejettent. La demande française serait nettement inférieure aux quantités ainsi produites (on pourrait peut-être essayer de l'exporter à bas prix ?).

BC UMV / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

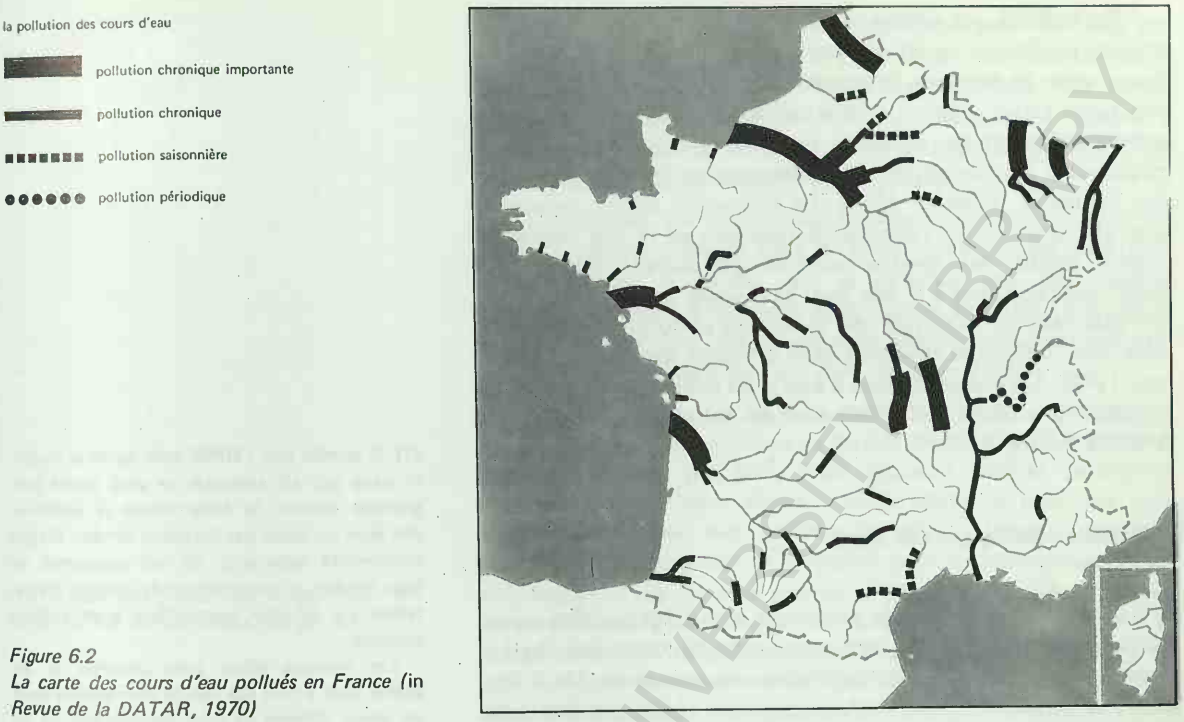


Figure 6.2
La carte des cours d'eau pollués en France (in Revue de la DATAR, 1970)

Aux Etats-Unis, la situation est catastrophique sur la côte Est, mais elle présente une certaine gravité dans bien d'autres régions. Le cas des Grands Lacs, en particulier ceux de l'Erié et de l'Ontario, mérite une mention spéciale. On estime qu'ils sont de nos jours dans un état de pollution irréversible à l'échelle humaine. Il faudrait un demi-millénaire pour qu'ils retrouvent un état satisfaisant si l'on cessait immédiatement tout rejet d'effluents ! La rivière de Detroit, qui alimente le lac Erié, y déverse de façon quotidienne 7,5 millions de m^3 d'effluents pollués (Powers et Robertson, 1966).

Le rapport de la Commission internationale d'étude des Grands Lacs, publié en 1971, a révélé que le lac Erié recevait chaque année 36 millions de tonnes de matières solides, 4 millions de tonnes de chlorures, 27 000 tonnes de phosphore et 160 000 tonnes de produits nitrés ! De plus, la rivière Niagara et quelques cours d'eau de moindre importance, rejettent dans le lac Ontario quelque 47×10^6 tonnes/an de matières solides, 6 millions de tonnes de chlorures, 12 000 tonnes de phosphore et 146 000 tonnes de produits nitrés !

Le coût de la lutte contre la pollution des Grands Lacs est estimé à 8 700 millions de francs pour la période 1968-1986. De façon générale, la situation est si grave aux Etats-Unis que le gouvernement a dû prendre de sévères mesures répressives et appliquer des sanctions rigoureuses aux industriels fautifs : des amendes pouvant s'élever à 50 000 dollars par jour sont prévues par la loi !

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

En U.R.S.S., on estime que 360 000 km de cours d'eau sont pollués. Le Donetz reçoit par exemple un million de m^3 par jour d'eaux usées de sucreries, de papeteries, de sidérurgie et autres industries (selon Colas, 1968). La forte contamination de la Volga par les agglomérations et les industries riveraines s'est traduite par une considérable diminution du stock d'esturgeons, donc de la production de caviar (Abelson, 1970). La raréfaction de ces poissons a aussi été favorisée par l'importante pollution de la mer Caspienne. Celle-ci résulte des diverses activités pétrolières : forages "off shore" qui rejettaient à la mer leurs eaux usées contaminées jusqu'à une date récente, nettoyage des soutes des pétroliers naviguant sur cette mer, raffineries déversant leurs effluents dans celle-ci (Simonov, 1970). On évalue au total à plus d'un million de francs par an les dégâts provoqués par la pollution des eaux aux pêcheurs de la RFSS de Russie (1).

(1) Il semble que l'URSS soit, après la Suède, le pays qui ait entrepris le plus grand programme concret de lutte contre la pollution des eaux au cours des dernières années. Malgré l'immensité apparente de ses ressources en eaux douces, la construction de stations d'épuration s'y effectue aujourd'hui à un rythme soutenu.

Les mesures prises pour protéger le lac Baïkal sont à bien des égards exemplaires pour un grand nombre de pays occidentaux où les "aménageurs" auraient agi tout autrement s'ils avaient disposé de ce qui constitue le principal réservoir d'eau douce du Monde. Toute unité industrielle ou tout ensemble urbain utilisant les eaux de ce lac est pourvu d'une station d'épuration. Aucune entreprise ou agglomération nouvelle ne sera construite sur ses rives tant que l'on n'aura pas pu juger de l'efficacité des dispositifs actuels. Si les risques d'eutrophisation paraissaient trop élevés, malgré ces diverses mesures, il est prévu de construire un canal de 100 km qui collecterait les eaux résiduaires de traitement des stations, contournerait la pointe S.O. du lac et rejetterait en aval dans l'Angara ces effluents riches en éléments minéraux nutritifs (selon Jacob, 1972).

La pollution biologique des eaux

L'immense majorité des substances polluantes, qu'elles soient gazeuses, liquides ou solides, sont susceptibles de contaminer l'hydrosphère. L'étendue de la contamination est *pro parte* liée à leur degré de solubilité. Cependant, l'expérience révèle que des substances aussi peu solubles dans l'eau que les hydrocarbures liquides ou les insecticides organochlorés peuvent s'insérer dans les biocœnoses limniques ou marines et y causer de multiples désordres.

Nous distinguerons trois catégories parmi les divers polluants des eaux : celle des agents biologiques de pollution (microorganismes et matières organiques fermentescibles), celle des agents chimiques (diverses substances toxiques ou modifiant des facteurs écologiques en milieu aquatique) et celle des agents physiques de pollution (caléfaction, radioactivité).

Elle résulte du rejet dans les eaux continentales ou littorales d'une grande variété de substances organiques fermentescibles. Celles-ci peuvent être d'origines diverses : effluents urbains ou industriels renfermant des détritus ménagers, des matières fécales, des lessives de sucreries, de papeteries, etc.

La pollution biologique des eaux se traduit par une forte contamination bactériologique. Elle soulève dans bien des cas de redoutables problèmes d'hygiène publique qui ne sont pas limités aux seuls pays du tiers monde.

Cette extension incessante de la pollution microbiologique des eaux continentales et littorales a pour conséquence une recrudescence d'affections telles que les colibacilloses ou les hépatites virales, dont la fréquence s'accroît avec régularité dans les nations industrialisées. L'actuelle extension de la pandémie cholérique montre aussi les redoutables problèmes épidémiologiques qui peuvent résulter de cette contamination biologique des eaux.

SOAS LIBRARY UNIVERSITY

Bien d'autres graves affections pathogènes sont favorisées par la pollution biologique des eaux. C'est le cas par exemple de la typhoïde, des dysenteries et des virus entériques. On ignore souvent qu'un des vaccins anti-poliomyélitiques a été préparé à partir d'une souche de ce virus, isolée de l'eau alimentaire d'une grande ville américaine (selon Ternisien, 1968).

L'utilisation des cours d'eau comme moyen de dilution des effluents urbains présente donc de graves conséquences pour l'hygiène publique. Il semble que la pollution par des matières organiques permette à de nombreuses espèces de germes pathogènes de se multiplier dans des proportions incommensurables par rapport à ce qu'ils auraient pu faire dans des eaux propres.

Faut-il rappeler que les eaux usées des anciens abattoirs de la Villette rejetaient 350 millions de germes aérobies et 20 millions de germes anaérobies par cm^3, dont plusieurs espèces pathogènes (d'après Planchon, dans Furon, 1962). Même le rejet des eaux d'égouts urbains en mer présente de sérieux risques bactériologiques pour les baigneurs et *a fortiori* pour les consommateurs de coquillages (1). Le fameux pouvoir antibiotique de l'eau de mer, souvent évoqué pour justifier des comportements inadmissibles et irresponsables de collectivités locales ou de pollueurs privés, ne joue que dans certaines limites. Les plages très fréquentées de la côte méditerranéenne sont polluées sur une grande étendue vers le large, par la persistance de divers germes de contamination fécale rejetés en mer par les émissaires des agglomérations riveraines (2). Il en est de même dans la région du bassin d'Arcachon, où papeteries et cités conjuguent leurs effets pour transformer en cloaque ce magnifique ensemble biologique dont la richesse des fonds faisait la joie des océanographes. Ce n'est pas la construction à grand frais d'un émissaire marin qui résoudra le problème. N'a-t-on pas trouvé à Los Angeles des colibacilles vivants à 14 km du rivage ?

Quelles sont les causes de contamination des eaux par des matières organiques ? Outre les rejets des égouts urbains, il faut mentionner ceux de diverses industries alimentaires hautement polluantes : abattoirs, laiteries, fromageries, sucreries, etc.

L'industrie du papier occupe aussi une place de choix dans la pollution organique des eaux. En effet, elle y déverse des lessives riches en glucides, donc hautement fermentescibles. Une papeterie "moyenne" pollue les eaux comme une ville de 500 000 habitants ! Le cas précité du bassin d'Arcachon illustre bien les graves conséquences qui peuvent résulter des rejets de cette industrie. La vie marine y est en voie de régression accélérée, les parcs d'huîtres sont menacés (3). L'usine de la Cellulose du Pin, située en amont déverse chaque jour sans traitement dans les eaux de la Leyre 90 000 m^3 d'effluents contaminés par des substances organiques. A cela s'ajoutent jusqu'à une date récente, les rejets des égouts des cités implantées autour du Bassin !

La charge de pollution organique d'une eau s'évalue par la DBO_5 : demande biologique d'oxygène en 5 jours. Celle-ci rend

(1) La baie des Anges, qui baigne Nice, renferme 10 000 germes coliformes par cm^3 !

(2) Si les coliformes ne sont pas dangereux par eux-mêmes, ce sont des indicateurs de la présence d'autres bactéries, virus, streptocoques, staphylocoques, levures pathogènes, etc., rejetés dans l'eau de mer. Leur concentration dans l'organisme des invertébrés microphages est connue depuis plusieurs années. La pollution microbiologique de la mer expose donc à de grands risques les consommateurs de coquillages., Divers travaux (Roos, 1956) mettent en évidence le rôle de cette contamination dans certaines épidémies d'hépatites. Liu et coll. (1966) ont montré que plusieurs espèces de mollusques accumulent des quantités significatives de poliovirus dans leur hémolymphe et leurs cœca digestifs !

(3) Soixante exploitations ostréïcoles ont dû fermer entre 1960 et 1965 à la suite de cette pollution. Tous les parcs à huîtres sont menacés, les premiers stades larvaires n'arrivent pas à se développer dans les eaux du bassin d'Arcachon et les ostréiculteurs doivent importer du naissain du Japon. La croissance des huîtres est deux fois plus lente qu'autrefois.

compte de la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader, minéraliser entièrement, la totalité des matières organiques présentes dans un litre d'eau polluée.

Dans les eaux d'égout des villes européennes, on évalue en moyenne à 190 g/habitant la quantité de matières dissoutes ou en suspension rejetée chaque jour dans les fleuves riverains. Sur ce total, on compte 50 g de matières organiques fermentescibles, qui nécessitent pour leur décomposition une DBO_5 par habitant de 54 g/jour en moyenne.

Tableau XLIII B — Charge moyenne de pollution des eaux en grammes par habitant et par jour pour les grandes villes d'Europe Occidentale (d'après Colas, 1968)

	Matières (en g/j/h)			*DBO_5 en g/h/jour*
	minérales	*organiques*	*Total*	
en suspension décantables	20	40	60	19
non décantables	10	20	30	12
dissoutes	50	50	100	
Totaux	80	110	190	54

A Paris, la DBO_5 est de 70 g/j/habitant, elle atteint même 84 g/j/h en certaines agglomérations industrielles !

Rappelons enfin que selon la loi française, une eau n'est considérée comme potable que si sa charge organique correspond à une DBO_5 inférieure à 5 mg/l, sa teneur en oxygène dissous excède 4 mg/l et si sa charge microbiologique est inférieure à 50 germes coliformes par cm^3. Elle doit aussi être exempte de résidus toxiques.

Pollution chimique des eaux

La pollution minérale des eaux résulte de la libération dans ces dernières de divers composés tels les nitrates, les phosphates et autres sels utilisés en agriculture, divers résidus rejetés par la métallurgie et d'autres activités.

PLOMB

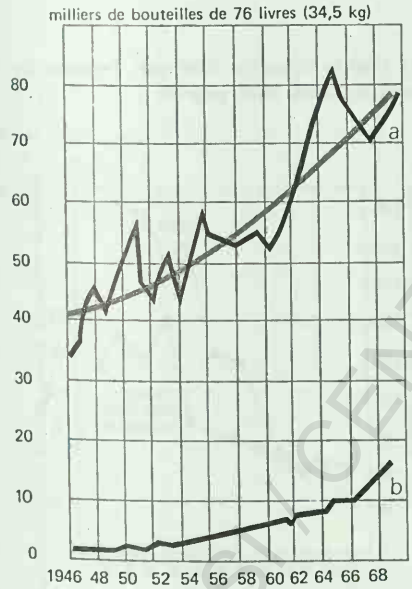
Nous avons cité dans le chapitre IV, la contamination globale de l'hydrosphère par le plomb utilisé comme adjuvant dans les carburants des moteurs d'automobiles.

Eu égard à l'immensité des surfaces océaniques, il pourrait paraître surprenant que l'on puisse détecter en pleine mer des traces de contamination par le plomb. L'expérience confirme pourtant ce fait. On estime à 25 000 tonnes l'apport annuel de plomb à l'océan, résultant de l'usage des alkyl-plomb comme anti-détonant. Chov et Patterson (1966) ont montré que la concen-

SUNY SI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

tration moyenne en plomb des eaux de l'Atlantique Nord s'est élevée de 0,01 à 0,07 mg/l au cours des 45 dernières années, à la suite de cet usage du plomb comme adjuvant dans les essences. Ces auteurs ont aussi observé une distribution verticale anormale de ce métal dans l'océan, qui ne peut être attribuée qu'à la pollution. Alors que le taux de dilution du baryum, un élément lourd voisin du plomb, croît avec la profondeur, ils observent l'inverse avec ce dernier. Ce sont les eaux du Pacifique, au large de San Diego, et celles de la Méditerranée, au voisinage de zones industrialisées, qui présentent les plus fortes concentrations en plomb, alors que les plus faibles taux dans l'eau de mer ont été relevés dans les parages des Bermudes. Il convient de souligner que l'on ignore tout actuellement des effets du plomb sur les biocœnoses marines, et en particulier sur les chaînes trophiques de prédateurs !

Outre le plomb, la décharge par diverses industries de cuivre, de zinc, de chrome, de nickel, de cadmium, éléments très toxiques pour les organismes limniques ou marins, constitue une grave menace pour l'hydrosphère. Il est aussi surprenant qu'un si petit nombre de travaux aient été consacrés au devenir du cuivre dans les eaux continentales, alors que les agricultures européennes et américaines utilisent chaque année des tonnages considérables de ce métal.



a : consommation totale
b : consommation des industries chimiques (chlore et soude caustique)

Figure 6.3
Consommation de mercure aux Etats-Unis. Celle-ci s'accroît depuis 1946 de façon exponentielle. D'après Commoner et coll. 1971, in *Meadows, 1972*

MERCURE

La pollution de l'hydrosphère par le mercure mérite une mention particulière à cause de la croissance de l'usage de ce métal (fig. 6.3) et la haute toxicité de certains de ses dérivés.

Elle s'est rendue tristement célèbre en 1956, lors de "l'accident" de la baie de Minamata au Japon, qui provoqua la mort de 43 personnes et en empoisonna gravement plusieurs centaines d'autres. Cette intoxication résultait d'une forte contamination des poissons et autres animaux marins, dont se nourrissaient les habitants de la baie, par les résidus mercuriels rejetés dans la mer avec les effluents d'une usine d'acétaldéhyde qui utilisait des sels de mercure comme catalyseurs.

La production mondiale de mercure dépasse aujourd'hui 10 000 tonnes par an (Goldwater, 1971). A cela il faut ajouter 3 000 tonnes de ce métal rejetées chaque année dans l'atmosphère par suite de l'utilisation des combustibles fossiles (Jeensu, 1971). Tout au plus 20 % sont recyclés dans l'industrie, le reste répandu dans l'environnement (Wallace et coll., 1968). Aux Etats-Unis, les diverses utilisations du mercure se répartissent de la façon suivante :

– 26 % de la consommation totale correspond à des usages où le métal est obligatoirement perdu dans la biosphère. En particulier, 17 % sert à fabriquer des pesticides, usage qui participe donc de façon significative à la pollution par cette substance car elle est dans ce cas intentionnellement dispersée dans divers écosystèmes ;

– 33 % sert dans l'électrochimie de la soude et du chlore et pourrait être en grande partie recyclé, mais est rejeté à l'eau ;

– 41 % sert à l'électrotechnique, la métrologie et à divers usages de laboratoire.

Le transfert de mercure des continents vers l'océan via les eaux courantes est estimé à 5 000 tonnes par an (Golberg, 1970).

De très nombreux SELS MINERAUX sont rejetés dans les eaux continentales ou marines par l'industrie et l'agriculture (engrais chimiques). Certains, comme les cyanures utilisés en galvanoplastie, sont extrêmement toxiques, de même que divers arsenicaux. Les liqueurs de papeteries riches en sulfites constituent aussi de redoutables contaminants. Outre leurs propriétés réductrices, ces substances présentent une action biocide qui n'est pas négligeable et s'ajoute à la déplétion du taux d'oxygène dissous.

NITRATES

Le problème de la pollution des eaux par les nitrates et les phosphates employés comme engrais chimiques en agriculture est aussi très préoccupant de nos jours. Nous en avons déjà partiellement traité au chapitre précédent.

Commoner a étudié les variations des quantités de nitrates rejetées au cours des 25 dernières années par les diverses sources susceptibles de contaminer l'environnement avec ces sels minéraux. Si les taux contenus dans les effluents urbains n'ont crû que de 70 %, les quantités rejetées par les moteurs à combustion interne se sont élevées de 300 % tandis que l'usage des engrais azotés s'élevait de 1 400 % pendant la même période (1).

Dans le cas des Etats-Unis, les experts estiment que les quantités totales de nitrates produites par les combustions et l'industrie des engrais, et dispersées dans le milieu naturel, s'élèvent à 10 millions de tonnes par an, chiffre considéré comme supérieur à celui résultant de la synthèse de nitrates par les divers processus biogéochimiques normaux qui contrôlent le cycle de l'azote dans l'ensemble du territoire fédéral.

Commoner (1970) a montré que la quantité de nitrates charriés par une rivière de l'Illinois est en corrélation directe avec la période où se fait l'apport d'engrais chimiques aux cultures, si l'on tient compte du décalage correspondant au temps nécessaire pour que s'effectue la percolation. Ce même auteur a aussi mis en évidence une bonne corrélation entre l'augmentation de la consommation des nitrates par la céréaliculture américaine et celle de la contamination des eaux superficielles par ces substances (fig. 6,4).

Les taux de pollution des eaux de boisson par les nitrates atteignent de nos jours des niveaux préoccupants en bien des régions d'Amérique du Nord et de la C.E.E. où le taux maximum de 10 ppm admis dans l'eau potable est assez souvent dépassé.

(1) D'après Scientific American, Pollution by fertilizers, mars 1969, page 48.

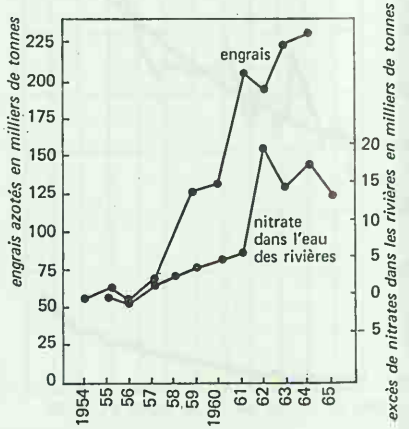


Figure 6.4
Corrélation entre la croissance de l'usage des engrais azotés et la pollution par les nitrates d'une rivière qui draine les terres ainsi fertilisées. D'après Commoner in *Singer "Global effect of environmental contamination", Reidel ed. 1970 p. 80*

BJAST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

PHOSPHATES

La contamination de l'eau par les phosphates est aussi des plus sérieuses dans les pays industrialisés. Nous savons que le phosphore est souvent le facteur limitant en milieu limnique ou océanique par suite de la faiblesse du taux de phosphates dissous.

La civilisation moderne a accru la vitesse de circulation du phosphore (cf. chap. V, p. 254). En effet l'agriculture utilise des tonnages considérables de divers phosphates. Ces sels constituent aussi des adjuvants importants des détersifs ménagers (Polyphosphates sodiques). Aux Etats-Unis, il s'est vendu en 1966 près de 2 milliards de kg de lessives synthétiques renfermant au total plus d'un million de tonnes de phosphates, qui ont été évidemment rejetés dans les eaux superficielles (Brenner, 1969). Les effluents urbains renferment en moyenne de 0,75 à 2 kg de phosphore minéral par an et par habitant (Hasler, 1970).

Les eaux renferment à la sortie d'une station d'épuration en moyenne 8 mg de phosphate/litre. Celui-ci provient de la minéralisation des matières organiques. Il faut ajouter à cette quantité les phosphates contenus dans les détersifs biodégradables. En moyenne, le traitement secondaire des eaux dans une station d'épuration enlève 80 % de phosphore. Aller au-delà n'est pas envisageable dans les données économiques actuelles. Ceci explique la persistance du risque d'eutrophisation des lacs par les rejets d'effluents urbains, même après passage en station d'épuration.

HYDROCARBURES

La pollution des eaux continentales et océaniques par les hydrocarbures constitue la principale cause de contamination de l'hydrosphère par la civilisation moderne. L'existence de régions marines, dans lesquelles les pétroliers peuvent légalement rejeter le contenu de leurs soutes après nettoyage (dégazage), constitue un véritable défi aux enseignements de l'océanographie. Le problème est de nos jours particulièrement préoccupant dans les régions d'estuaires fort poissonneuses, dont les produits des pêcheries ne peuvent plus être consommés à cause du goût *sui generis* que le pétrole confère aux poissons. En outre, l'équilibre écologique des mers fermées paraît de plus en plus compromis par cet agent polluant.

La pollution par les hydrocarbures résulte de divers phénomènes liés à l'extraction du pétrole, à son transport maritime et en aval à l'utilisation des produits finis : carburants et lubrifiants.

La principale source de contamination du milieu océanique résulte du transport du pétrole, et, dans une moindre mesure, des accidents survenus aux puits sous-marins dont la fréquence ne pourra que s'accroître au fur et à mesure qu'augmente le nombre de forages "offshore". Actuellement, plus d'un milliard de tonnes de pétrole sont chaque année transportées par voie maritime. Une fraction de cette masse, estimée au moins à 0,1 % et souvent à

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

0,5 %, est rejetée dans l'océan de façon plus ou moins légale : il s'agit d'une cause de pollution non pas accidentelle mais volontaire. Elle résulte de la pratique du dégazage en mer. Après décharge de la cargaison, les citernes sont nettoyées avec de l'eau de mer et les soutes ballastées avec celle-ci pour conférer une plus grande stabilité au navire allégé. Cette eau souillée de pétrole est ensuite rejetée en haute mer dans des zones délimitées par des conventions internationales (fig. 6.5) mais souvent aussi de façon frauduleuse près des côtes, à l'encontre de ces lois. De la sorte, 300 000 tonnes de produits pétroliers ont été légalement déversées en Méditerranée en 1970 dans deux zones de dégazage autorisées situées l'une au sud-ouest de Chypre, l'autre entre l'Italie et la Libye. Mais en outre les côtes de cette mer, de même que celles de la Manche et de la mer du Nord, sont systématiquement contaminées par les dégazages illicites et les délestages des pétroliers. Une véritable marée noire est lâchée chaque jour par les quelque trois cents navires qui

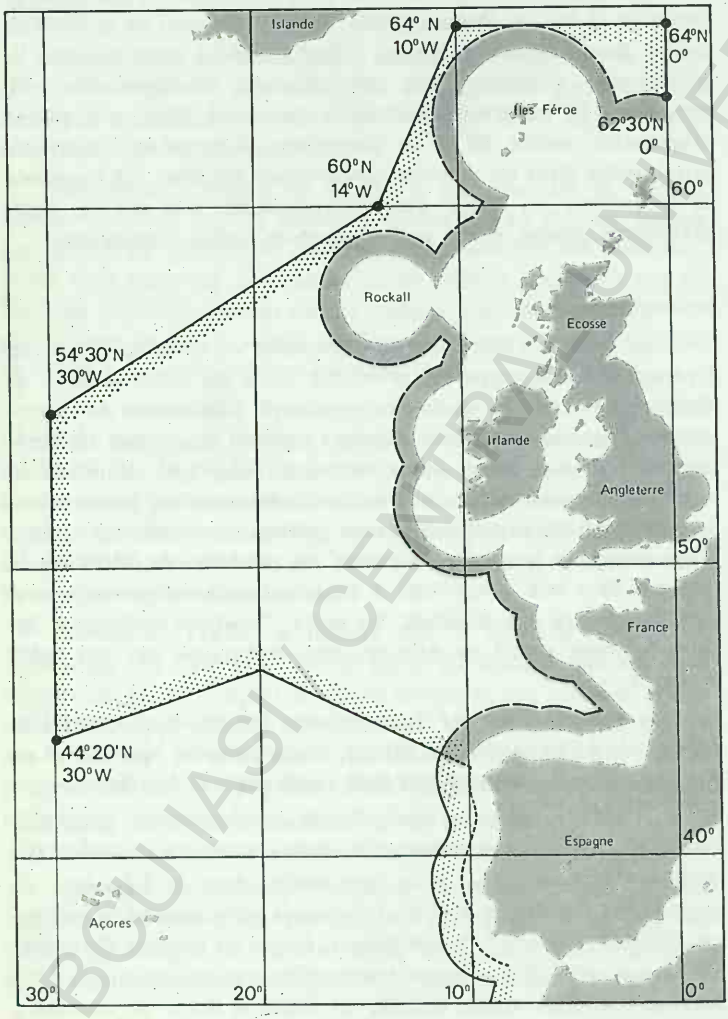


Figure 6.5
Carte des zones d'interdiction du rejet d'hydrocarbures dans l'Atlantique. 1 — limites des zones de rejet interdites aux pétroliers ; 2 — limites des zones de rejets interdites aux autres navires ; 3 — limite provisoire en attendant la ratification de la convention par les pays Ibériques. D'après Cartographie UICNM 1952, in *Pichon 1970, Cahiers Ing. Agron. 247, p. 74.*

BOU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

franchissent le Pas-de-Calais en empruntant la voie de navigation qui longe les côtes françaises. La technique utilisée consiste soit à opérer de nuit, soit à rejeter les eaux souillées dans le sillage du navire, ce qui rend l'identification impossible aux avions de surveillance. Des centaines de tonnes de pétrole sont donc déversées dans la mer à chaque voyage.

Outre le transport proprement dit du pétrole, une autre source de contamination de l'océan, accidentelle celle-là, provient des collisions entre pétroliers ou de leur échouage. Quelque cinq cents sinistres de ce type furent recensés entre 1960 et 1970. On imagine sans peine l'ampleur des risques inhérents à la navigation de "super-tankers" qui jaugent quelque 400 000 tonnes de port en lourd. Ces navires ne peuvent franchir qu'un nombre limité de détroits et n'accoster qu'en quelques installations portuaires dans l'ensemble du monde (Fos, en France, par exemple). Nous avons déjà traité de l'accident du "Torrey-Canyon"; qu'arrivera-t-il lorsque le même sinistre adviendra à de tels bâtiments, car on ne peut exclure *a priori* cette éventualité ?

Les accidents survenus aux puits de pétrole "off-shore" peuvent aussi gravement contaminer l'océan. Au moment des opérations de forage, de tubage, à celui de la pose de la tête du puits et au cours de son exploitation existent de graves risques de pollution (Grenon, 1971). Le premier grave sinistre survenu à un forage sous-marin fut celui de Santa-Barbara en Californie. La fissure de la tête du puits libéra dans la mer des dizaines de milliers de tonnes de pétrole au total. Aux environs de Los Angeles, la dérive d'une immense flaque de pétrole couvrant 1 800 km^2 de surface océanique causa de graves dommages à tout le littoral, en particulier à des réserves ornithologiques.

Quel est l'ordre de grandeur de la quantité totale de pétrole que l'homme rejette chaque année dans l'océan mondial, compte tenu de la totalité des sources de pollution ?

Malgré les incertitudes qui subsistent sur une pareille évaluation, la plupart des auteurs s'entendent sur un chiffre de 5 millions de tonnes par an (Blumer, 1972). Cependant, plusieurs experts vont jusqu'à 10 millions de tonnes par an (Mac Intyre et Holmes, 1971). Comme une tonne de pétrole s'étale sur 12 km^2 de surface océanique, il y a longtemps que l'océan mondial est recouvert en permanence d'un mince film d'hydrocarbures (Furon, 1962).

Dans les immanquables controverses sur l'importance de ce degré de pollution entre les responsables de cette contamination (Compagnies de transport pétrolier) et les autorités administratives ou scientifiques chargées de la protection du milieu marin, un argument est souvent avancé par les pollueurs. Il se réfère à l'existence de suintements naturels de pétrole dans les fonds sous-marins dus à la remontée spontanée du contenu de certains gisements situés sous le plateau continental [1]. Blumer (1972) a

(1) Alibi classique évoqué par tous les destructeurs de l'environnement : "La Nature aussi...".

BSU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

fait place nette d'une telle affirmation. Cet auteur a montré que si les gisements sous-marins provoquaient un taux de contamination de l'océan égal à celui provoqué par l'industrie pétrolière (au sens large), l'ensemble de ces derniers devraient se vider entièrement de leur contenu en 20 000 ans. En effet, les géologues ont évalué tout au plus à 100 milliards de tonnes, le volume des gisements "off-shore" susceptibles de produire de telles fuites. Or, on sait que leur âge moyen est de 50 millions d'années !

Les eaux continentales sont aussi fortement contaminées, selon plusieurs modalités, par les hydrocarbures. Les effluents des raffineries, les vidanges "sauvages" de moteurs d'automobiles, les pertes d'huile des carters, celles d'essence ou de gas-oil au moment du remplissage des réservoirs, constituent autant de sources de contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques. Comme l'essence s'infiltre dans le sol à une vitesse sept fois supérieure à celle de l'eau et qu'elle communique un goût détestable à l'eau de boisson à des concentrations aussi faibles que 1 ppb, cette pollution peut rendre impropre à la consommation des réserves considérables d'eaux souterraines. Par ailleurs tous les fleuves des pays industrialisés charrient des hydrocarbures. Ainsi, le Rhin transporte quelque 12 000 tonnes par jour de produits pétroliers sur son cours inférieur.

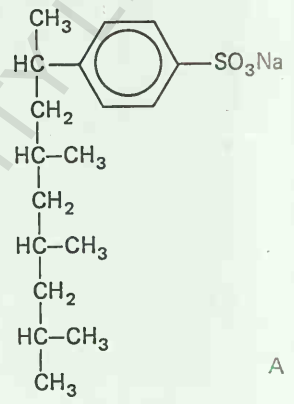
Pollution par les substances organiques de synthèse

LES DETERSIFS

Les détersifs synthétiques se sont répandus dans les usages domestiques à partir de 1950. Ils renferment une substance active : le détergent, doué de propriétés surfactantes, tensioactives, dilué dans une charge de tripolyphosphate de soude ou de pyrophosphate tétrasodique. En outre, ils contiennent des ingrédients mineurs (parfums, agents "blanchissants", persulfates, perborates), dont la toxicité n'est pas négligeable pour les organismes aquatiques.

Les plus employés des surfactants sont des détergents anioniques, qui sont les moins toxiques. Les substances diminuent la tensioactivité et la viscosité de l'eau. On les a substitués aux savons car ils moussent facilement et émulsionnent sans difficulté les graisses. Ils sont efficaces même avec des eaux "dures", à la différence du savon. Les détergents anioniques sont des alkylbenzène sulfonates. Pendant longtemps, le plus utilisé d'entre eux fut le tétrapropylène benzène sulfonate (TBS), non biodégradable (fig. 6.6A).

On leur a substitué depuis les alkyl sulfonates linéaires ou LAS (fig. 6.6B), biodégradables à 99 %. Notons cependant que la loi française autorise encore les produits non biodégradables, bien qu'elle impose depuis 1971, 80 % de biodégradabilité en trois semaines pour tout détersif commercialisé. Malheureusement, les



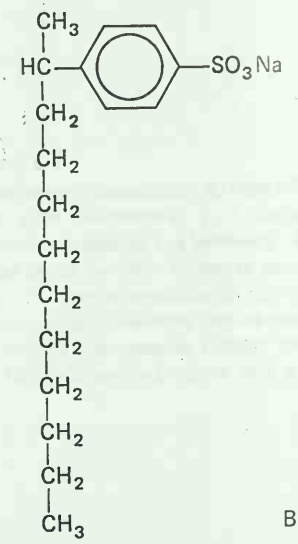


Figure 6.6
Structure chimique des détergents anioniques
A – Tétrapropylène Benzène Sulfonate (TBS) non biodégradable
B – Alkylbenzène sulfonate linéaire (LAS), biodégradable

SCI INST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

20 % restants représentent en valeur absolue un taux tout à fait excessif par suite de ses effets écologiques.

En Grande-Bretagne, où le citoyen, fût-il industriel, est beaucoup plus conscient que chez nous de ses responsabilités dans le domaine de la protection de l'environnement, les fabricants ont pris d'eux-mêmes et dès 1965 la décision de ne produire que des détersifs biodégradables. Aussi, le taux moyen de ces substances dans la Tamise est passé de 0,35 mg/l pendant la période 1954-65 à 0,06 mg/l pendant les six premiers mois de 1966 (selon Brenner, 1969).

LES PESTICIDES

La production et l'emploi des produits antiparasitaires constituent une grave menace pour l'hydrosphère. La fabrication industrielle des pesticides représente une importante source de contamination des eaux continentales et marines. Elle a pour origine le rejet dans celles-ci des résidus de synthèse de ces substances par les usines implantées au bord des fleuves ou des côtes. Les exemples de pollution survenue à la suite de pratiques aussi aberrantes ne se comptent plus.

En France, les habitants de la ville d'Arles se plaignirent dès 1948 du goût détestable que prit soudain leur eau de boisson. En période d'étiage du fleuve, les légumes cuits dans cette eau devenaient impropres à la consommation et les animaux refusaient de la boire. Il importe de préciser qu'à cette époque, la filtration et l'ozonisation des eaux du Rhône suffisaient à les rendre potables. Il apparut que la pollution constatée provenait du rejet dans l'Isère, à Pont de Claix, de résidus de fabrication d'herbicides du groupe du 2,4 D par une usine de produits chimiques, laquelle était donc distante de plusieurs centaines de kilomètres de la ville d'Arles ! (d'après Cheret, 1967).

Grzenda (1964) rapporte qu'on a observé dans les limons du Mississippi, en aval de Memphis, près de l'émissaire d'une usine fabriquant une préparation commerciale destinée à lutter contre la chenille de la canne à sucre *(Diatraea saccharalis)*, une teneur en endrine égale au dixième de la concentration en matières actives de la formulation ainsi élaborée ! De même, la côte hollandaise de la mer du Nord, semble avoir subi une forte contamination avec la dieldrine, à la suite du rejet d'eaux usées par une usine située près de Rotterdam (Kœman et coll., 1967).

En Californie, une action en justice a été intentée en 1971 par la Food and Drug Administration contre une grande entreprise de la Montrose chemicals. Celle-ci rejetait à la mer ses résidus de fabrication du DDT. Les poissons pêchés sur le littoral dans une zone assez étendue, aux environs du point de rejet, renfermaient des concentrations de DDT inadmissibles pour l'alimentation humaine, et ne pouvaient plus être commercialisés. Ainsi furent saisies pour être détruites par la FDA 3 500 kg de dorades qui renfermaient 19 ppm de DDT dans leurs tissus (Jones, 1971) !

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Ainsi que le soulignent Westlake et Gunther (1966), les eaux souterraines et les rivières sont dorénavant exposées en permanence au déversement des déchets industriels provenant de la fabrication des pesticides. En outre, le stockage de masses énormes de tels résidus provoquera par le jeu des infiltrations et pendant des siècles une contamination des nappes phréatiques.

Une autre source majeure de pollution des eaux continentales et littorales a pour origine les traitements insecticides effectués par voie aérienne sur d'immenses surfaces.

Ces épandages massifs, souvent entrepris dans le cadre de diverses campagnes "d'éradication", sont exécutés au-dessus des lacs, marécages et étangs (démoustication, par exemple) ou sur des zones forestières (cf. chapitre V, p. 281).

Comment expliquer la présence de traces de DDT (à raison de 0,3 ppb) dans les neiges éternelles du mont Olympe dans les montagnes Rocheuses, aux Etats-Unis (et à partir de 1944, date à partir de laquelle cet insecticide a été utilisé à très grande échelle) ? Comment expliquer la contamination systématique par le DDT, la dieldrine, l'heptachloroépoxyde et le lindane de la plupart des vertébrés étudiés dans l'Antarctique (Tatton et Ruzicka, 1967), à raison de 2 à 7 ppb selon l'espèce ou le composé étudié ?

Le traitement des forêts et des cultures fixe dans les couches superficielles du sol des particules de toxique qui passent dans la nappe phréatique et sont entraînées dans les cours d'eau par l'érosion pluviale. Ainsi, Grzenda et coll. (1964) ont par exemple mis en évidence une forte contamination des cours d'eau par les pulvérisations aériennes de DDT destinées à lutter contre les insectes forestiers.

Mais en outre, une fraction importante des matières actives dispersées sont volatilisées dans l'atmosphère car le vent entraîne dans l'air des particules solides adsorbant les pesticides et les brouillards produits par les machines de pulvérisation, même par temps calme, passent aussi dans l'atmosphère. A cela s'ajoutent les phénomènes de codistillation déjà évoqués (cf. page 265). Pris dans les courants stratosphériques, les pesticides sont distribués à une échelle globale et les précipitations les font retomber sur les terres émergées et les océans, où les courants marins achèvent leur répartition dans l'ensemble de l'hydrosphère. Cependant, les fleuves interviennent pour une part prépondérante dans la contamination des eaux marines du plateau continental de l'hémisphère Nord.

L'existence de résidus organochlorés dans les organismes océaniques est un phénomène assez étonnant car ils sont pratiquement insolubles dans l'eau et y demeurent en suspension, adsorbés par la matière organique. Il semble que leur répartition homogène à la surface des mers soit un effet secondaire de leur pollution par le pétrole. A la suite de leur forte solubilité dans les hydrocarbures, les pesticides s'émulsionneraient dans ces derniers, ce qui favoriserait leur dispersion et leur transport par les courants marins dans des zones très éloignées.

BUNDESANSTALT UNIVERSITY LIBRARY

Les écosystèmes limniques sont *a fortiori* pollués de façon sans cesse accrue par les pesticides.

Aux Etats-Unis, les principaux cours d'eaux du pays et de nombreuses nappes phréatiques renfermaient, au début des années 60, des traces significatives de divers insecticides organochlorés et parfois de parathion et d'herbicides (Nicholson et Thoman, 1965).

En France, de récentes recherches ont montré que les résidus de certains traitements phytosanitaires contaminent à des degrés divers le plus remarquable des écosystèmes limniques de notre pays : la Camargue (Mestres, Heurteaux, Vaquer et coll., 1972).

L'usage d'insecticides organochlorés et dans une moindre mesure du parathion dans les luzernières, les vignobles et les rizières, se traduit par une pollution significative des canaux du Vaccarès, et des étangs inférieurs (cf. tableau XLIII C). La présence du PCB *(polychlorobiphényles)* est due à l'emploi en riziculture d'une préparation de DDT et d'HCH en mélange, synergisée par du penta et de l'octochlorobiphényle !

La pollution des étangs s'est déjà traduite par une concentration de ces substances dans les chaînes trophiques ainsi qu'en atteste la présence cumulée de 0,01 ppm de lindane, 0,02 ppm de DDE et 2 ppm de PCB dans la chaîne d'une carpe et de 0,15 ppm de lindane, 5,7 ppm de DDT, 3,8 ppm de DDE et 23 ppm de PCB dans l'œuf d'une mouette renfermant un embryon non éclos !

Tableau XLIII C — Contamination de la Camargue par les traitements pesticides (d'après Mestres, Heurteaux, Vaquer, et coll., 1972)

Biotopes	*Canaux*		*Marais* (St-Seren)		*Etang* (Vaccares)	
échantillon / *Insecticides	*eaux*	*sédiments*	*eaux*	*sédiments*	*eaux*	*sédiments*
HCH	0,04	n.d	n.d	n.d	0,08	n.d
PCB	1,2	6	n.d	8	n.i	10
PCC	12	370	n.d	n.d	30	n.i
Parathion	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	9

* doses en ppb, n.d = non déterminé, n.i = non identifiable

POLYCHLOROBIPHENYLES (PCB)

Ces substances sont des agents plastifiants de structure moléculaire proche de celle du DDT [1]. Les PCB sont très utilisés dans l'industrie des matières plastiques, comme matériaux d'imprégnation et d'isolement des câblages électriques, comme adjuvants des huiles de coupe dans l'industrie métallurgique, voire comme . . . synergistes d'insecticides chlorés (cf. *supra*).

Ils sont dispersés dans la biosphère avec les détritus renfermant des matières plastiques et surtout lors des combustions incomplètes de ces derniers sur les décharges d'ordures ou dans les incinérateurs.

(1) Les PCB sont des mélanges impurs de biphényles chlorés à divers degrés. Il en existe plusieurs types renfermant de 32 à 62 % de chlore. Certains, comme le *phénoclor,* renferment une impureté, un dibenzofuranne chloré, très toxique.

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La pollution des eaux marines et continentales par les PCB est aussi importante et tout au moins aussi étendue que celle provoquée par les insecticides organochlorés (Rizebrough, Rieche, Peakall et coll., 1968).

Ainsi une zone lacustre du Wisconsin, éloignée de tout centre industriel, a révélé une sérieuse pollution de ses biocœnoses par ces substances. Des pélicans *(Pelecanus erythrorhynchos)* et des cormorans *(Phalocrocorax auritus)* qui nichaient dans ces marécages ont montré une sensible atténuation de leur potentiel biotique à la suite de la contamination de leur chaîne trophique par les PCB (Anderson, Hickey, Rizebrough et coll., 1968).

L'océan mondial est systématiquement pollué, même dans ses régions les plus reculées, par les polychlorobiphényles ainsi qu'en atteste l'analyse de divers procellariiformes (petrels, puffins, fulmars), oiseaux pélagiques qui passent la majeure partie de leur existence en haute mer et ne viennent au sol qu'au moment de la reproduction (cf. tableau XLIV).

Tableau XLIV — Contamination de diverses espèces de procellariiformes par les polychlorobiphényles et divers dérivés du DDT (d'après divers auteurs, dans Rizebrough, 1971)

Espèce	*Lieu de capture (lieu de reproduction)*	*Tissus analysés*	*DDT et ses métabolites (en ppm)*	*PCB (en ppm)*
Fulmarus glacialis	Californie (Alaska)	Oiseau entier	7,1	2,3
Puffinus creatopus	Mexique (Chili)	"	3,0	0,4
" *griseus*	Californie	"	11,3	1,1
	(Nlle Zélande)	graisses	40,9	52,6
Puffinus gravis	New Brunswick	"		
	(Atlant. austral)	"	70,9	104,3
Pterodroma cahow (Petrel des Bermudes)	Bermudes (Atlant. austral)	Oiseau entier	6,4	—
Oceanodromma leucorhœa (Petrel de Leach)	Californie (Californie)	graisses *ex ovo*	953 !	351 !
Petrel de Wilson *(Oceanites oceanicus)*	New Brunswick (Antarctique)	graisses	199 !	697 !

Des travaux suédois (fig. 6.7) ont mis en évidence la contamination systématique de nombreux vertébrés marins de la Baltique par les PCB (Jensen, Johnels, Olsson et Otterlind, 1969).

Toutefois, malgré l'importance de cette polution de l'océan mondial par les PCB, celle-ci paraît dans la plupart des cas inférieure à celle qui résulte de l'usage du DDT et autres insecticides chlorés.

UQAM / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

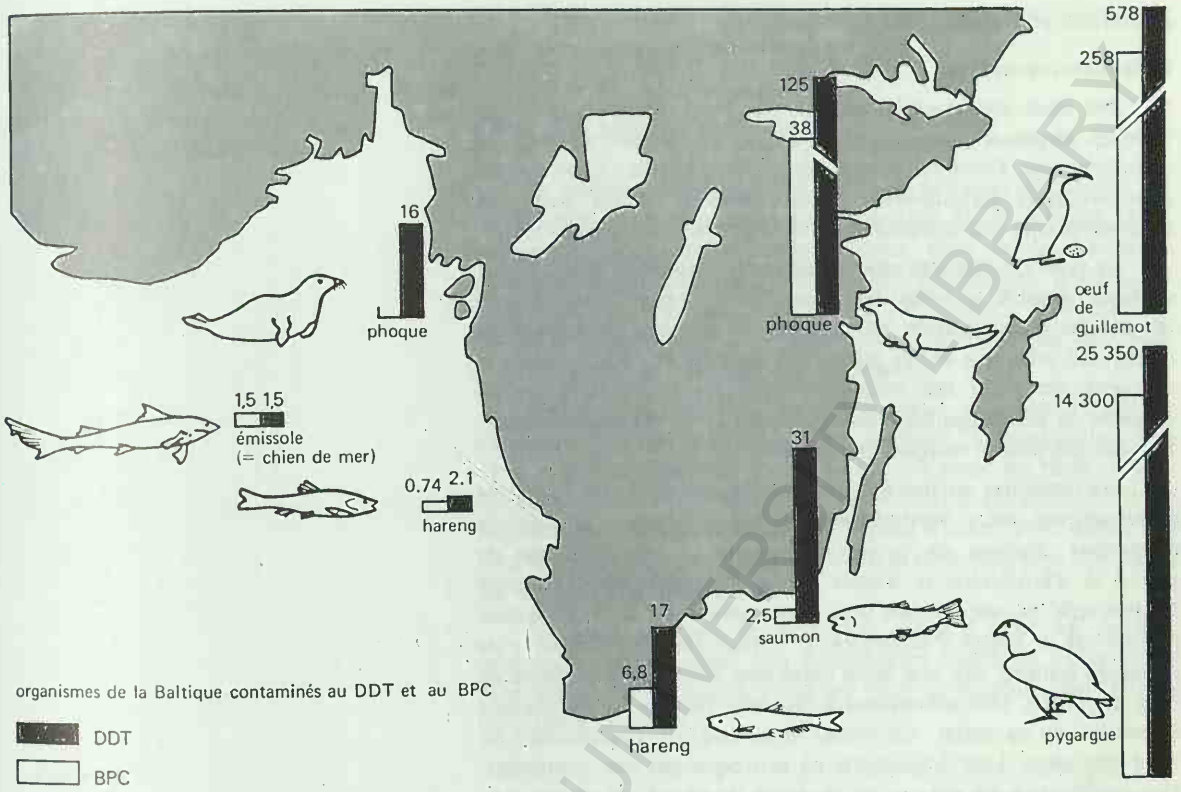


Figure 6.7
Contamination des biocoenoses marines de la Baltique et de la Mer du Nord par le DDT et les PCB. D'après Jensen et coll. in *Nature 1969, vol. 224, p. 247, mais modifié par Barde et Garnier, 1971*

Autres substances organiques de synthèse

La civilisation technologique rejette dans les eaux de façon directe ou accidentelle, d'innombrables substances organiques de synthèse. Les matières plastiques constituent de nos jours un contaminant très répandu dans le milieu marin : on en a découvert des fragments entraînés par les courants qui dérivaient en plein milieu de la mer des Sargasses ou de régions pélagiques encore plus reculées (Carpenter et Smith, 1972).

Les phénols figurent aussi parmi de redoutables polluants des eaux continentales. Leur toxicité est des plus élevées pour la plupart des organismes aquatiques. Il en est de même pour les crésols et leurs homologues supérieurs.

Enfin, que penser des déversements volontaires dans les océans de résidus renfermant des composés de synthèse très toxiques ou de toute autre substance dont on veut se débarrasser ? Certes, dans la plupart des cas les matériaux sont enfermés dans des caissons ou des fûts métalliques étanches. Mais qu'adviendra-t-il lorsque ces récipients seront corrodés ?

L'immersion d'un stock de plusieurs milliers de tonnes d'un gaz de combat, le Sarin, ester phosphorique de toxicité effarante, au fond du golfe du Mexique par l'armée américaine, le 18 août 1970, situe bien l'ampleur du problème (Nguyen Dang Tam, 1970).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Altérations physiques de l'hydrosphère

MATERIAUX INSOLUBLES

Les eaux continentales sont de nos jours menacées dans leur intégrité physique. Les marécages, en particulier, ont toujours été considérés par l'homme comme un milieu hostile. Leur surface dans les pays industrialisés régresse sans cesse par suite des assèchements et des comblements (cf. chapitre VIII, p. 491).

Le rejet de matières solides minérales insolubles peut affecter de façon sensible le milieu limnique. Tel est le cas du déversement des résidus d'exploitation de carrières ou de mines dans les cours d'eau. Les alluvions et les argiles qui peuvent être ainsi rejetés se déposent sur le lit des rivières et constituent une pellicule qui empêche le développement de la couverture biologique naturelle. De plus, ces dépôts ravagent les frayères.

Une mention particulière doit ici être faite d'une forme de pollution des eaux continentales due à la chasse. L'usage de cartouches chargées de projectiles constitués par un alliage de plomb et d'antimoine se traduit par la dispersion d'une quantité considérable de ces derniers dans l'environnement. Dans une seule journée de la saison d'ouverture, si chacun des deux millions de chasseurs français tire une seule cartouche chargée en moyenne de 32 g de plomb, cela correspond à répandre dans la nature quelque 64 tonnes de ce métal. En milieu aquatique, ils s'accumulent au fond des eaux. Leur insolubilité ne provoque pas une contamination significative de celles-ci et ce dépôt de plomb de chasse dans les écosystèmes limniques est inoffensif pour la faune dulçaquicole. En revanche, il s'avère catastrophique pour les Anatidés qui les avalent avec leur nourriture si ce n'est volontairement. En effet, les canards comme bien d'autres oiseaux ont l'habitude d'ingérer de petits cailloux et divers objets durs qui s'accumulent dans leur gésier, et ont pour rôle de faciliter le travail de broyage des aliments, lequel chez les oiseaux, animaux dépourvus de dents, est dévolu à cet organe.

L'accumulation de ces plombs dans le gésier va provoquer à plus ou moins brève échéance une grave intoxication, dénommée saturnisme, fatale aux canards ainsi contaminés. L'étude par radiographie de quelque 35 500 individus appartenant à la Station Ornithologique de la Tour du Valat a montré que 40 % des cols-verts (*Anas platyrhynchos*) et 5 % des sarcelles (*Anas crecca*) étaient atteints de saturnisme (Hovette, 1972). Il s'ensuit une mortalité considérable dans les populations aviennes ainsi contaminées.

BCU IAST LIBRARY UNIVERSITY LIBRARY

CONSEQUENCES ECOLOGIQUES DE LA POLLUTION DES EAUX

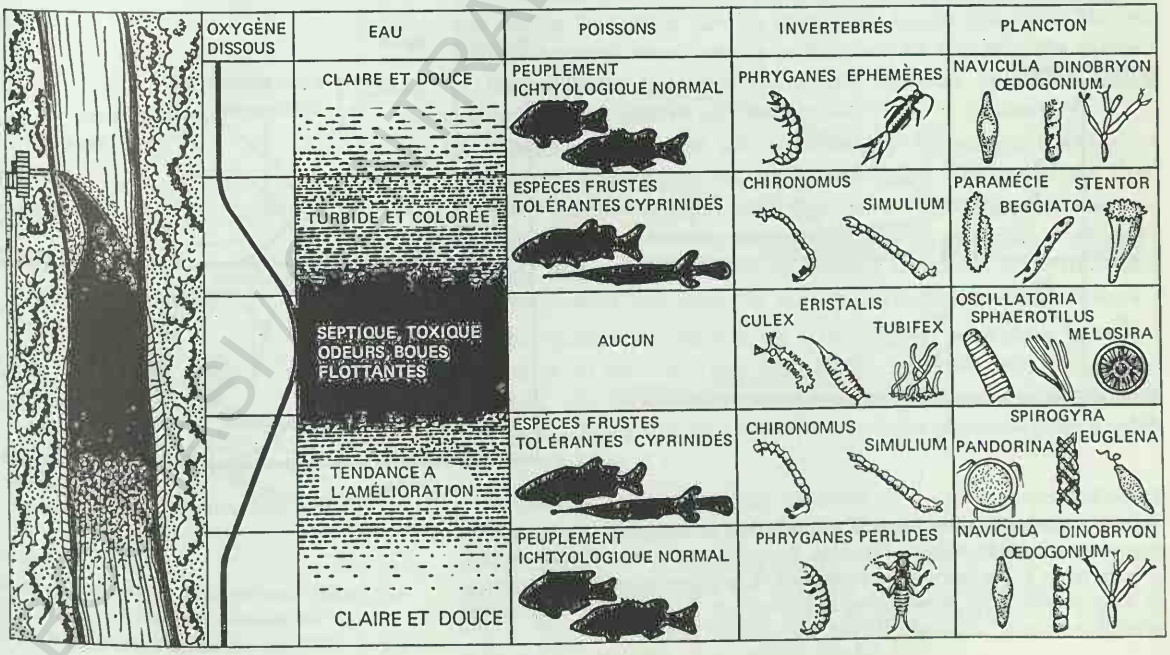
Effets de la pollution organique

La pollution organique des eaux agit de façon comparable sur les facteurs abiotiques et biotiques tant en faciès lotiques (eaux courantes) qu'en faciès lentiques (lacs, eaux calmes de façon générale). Cependant, les conséquences écologiques globales de cette pollution présentent des différences notables et il convient d'étudier séparément le problème dans chacune de ces deux grandes catégories d'écosystèmes limniques.

Une caractéristique essentielle des eaux courantes résulte du perpétuel brassage qui assure en première approximation une certaine homogénéité du milieu aussi bien pour les facteurs physiochimiques normaux que pour les polluants. Le problème de la pollution de tels écosystèmes paraît donc *a priori* plus simple que celui des lacs, baies ou estuaires, milieux beaucoup plus complexes par suite de leur hétérogénéité.

En *faciès lotique,* le rejet d'un effluent riche en matières organiques va provoquer une perturbation totale de l'écosystème avec apparition de quatre zones qui vont se succéder dans le sens du courant (fig. 6.9).

Figure 6.9
Effets de la pollution organique d'une rivière sur sa biocoenose. (Explications dans le texte). D'après Eliassen, Scient. Amer., vol. 186, n° 3, mars 1952



Tout d'abord s'observe une *zone de dégradation,* où les eaux du fleuve et celles de l'effluent se mélangent. Une *zone de décomposition active* lui fait suite, où champignons et bactéries aérobies puis anaérobies vont se multiplier et décomposer la matière organique introduite dans le cours d'eau. Si tout l'oxygène est consommé, celle-ci deviendra une *zone septique* dans laquelle se formeront des composés réducteurs. Plus en aval s'observera une *zone de restauration,* où l'épuration va peu à peu restituer aux eaux leurs caractères initiaux et à laquelle succèdera progressivement une *zone d'eaux propres.*

En définitive, on peut comparer avec Wuhrman (1972) un fleuve à un système de fermentation continue doué d'un pouvoir autoépurateur. Le terme de purification doit ici être pris au sens *d'élimination* de la matière organique particulaire ou dissoute douée de propriétés polluantes. Les composés chimiques présents dans l'eau ou déposés dans les sédiments constituent d'authentiques facteurs écologiques pour les associations biocœnotiques qui se développent à n'importe quel point du cours d'eau.

L'autoépuration induit par conséquent des effets secondaires tels que l'apparition de gradients dans la concentration d'oxygène et d'éléments nutritifs ainsi que des gradients biologiques (fig. 6.10).

Une véritable pullulation bactérienne se produit dans un effluent pollué par des matières organiques.

A côté des espèces pathogènes qu'il peut contenir, on y observe essentiellement des microorganismes saprophytes : bactéries hétérotrophes et champignons qui décomposent les diverses substances biochimiques en sels minéraux.

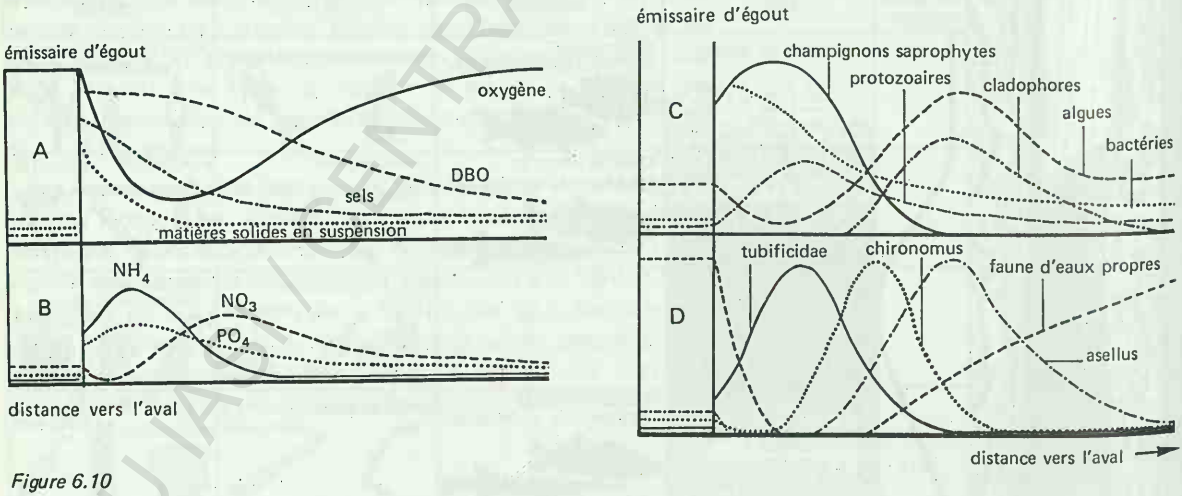


Figure 6.10
Représentation diagrammatique des perturbations provoquées par une pollution organique en faciès lotique. En A et B, modification des facteurs physico-chimiques, en C changements observés dans les autotrophes et les décomposeurs de la communauté ; D, perturbations de zoocoenose. D'après Hynes "the biology of polluted waters", Liverpool University Press 1960, p. 94

L'existence de cette flore microbienne permet la dégradation de tout effluent organique par des bactéries adaptées à sa composition et dont la densité de population ne diminuera vers l'aval qu'à partir du moment où la concentration en éléments nutritifs organiques deviendra trop réduite.

On observe une très grande variété de formes bactériennes dans les eaux polluées par des matières organiques fermentescibles. Certaines espèces dégradent la cellulose, l'amidon, les lipides ou les protéines, d'autres encore utilisent les produits de décomposition de ces substances.

Certaines espèces de bactéries anaérobies vivent dans les eaux sans oxygène ou dans les boues réductrices et produisent du méthane par dégradation de molécules hydrocarbonées de structure simple. Dans les milieux pauvres en oxygène ou dépourvus de celui-ci se rencontrent certaines espèces de sulfobactériales, comme *Desulfovibrio desulphuricans,* qui réduisent les sulfates en sulfure et produisent de l'hydrogène sulfuré d'odeur caractéristique. Ces microorganismes confèrent aux boues et aux limons une couleur noirâtre, car ils déterminent la formation de sulfure ferreux, noir, par réaction du fer avec l'hydrogène sulfuré.

D'autres bactéries anaérobies ammonifiantes métabolisent les composés azotés et dégagent de l'ammoniac (fig. 6.10 B).

Certaines espèces bactériennes saprophytiques qui pullulent dans les eaux polluées se rassemblent en colonies de grande taille, d'aspect gélatineux ou filamenteux, visibles à l'œil nu. Parmi celles-ci, nous citerons les *Sphaerotilus natans,* qui s'agglomèrent en filaments gélatineux. C'est une bactérie hétérotrophe fréquente dans les eaux polluées par des matières organiques glucidiques, car elle utilise les sucres comme principale source nutritive. Elle est particulièrement abondante de ce fait dans les effluents des laiteries et des sucreries. Elle constitue d'épais feutrages de couleur brune sur le fond des cours d'eau contaminés.

Beggiatoa alba est une sulfobactérie nécessitant la présence simultanée d'hydrogène sulfuré et d'oxygène. Ces conditions sont réalisées quand des boues anaérobies sont en contact avec une eau qui n'est pas totalement désoxygénée par la pollution organique. Elle est plus commune dans les lagunes saumâtres du littoral que dans les rivières, par suite de leur plus grande richesse en sulfures.

De nombreuses espèces de sulfobactéries anaérobies pullulent aussi dans les eaux chargées de matières organiques. Mais, outre les bactéries, ces dernières renferment aussi une riche flore fongique. Les champignons des eaux septiques sont des phycomycètes ou des ascomycètes (fig. 6.11).

Apodya lactea donne des colonies de mycelium ressemblant à des filaments cotonneux. Cette espèce requiert la présence simultanée d'oxygène en quantité suffisante et d'azote organique. Elle est fréquente en hiver dans les effluents de papeteries car, en cette saison, le taux de dégradation de la matière organique est faible et la teneur en oxygène relativement élevée.

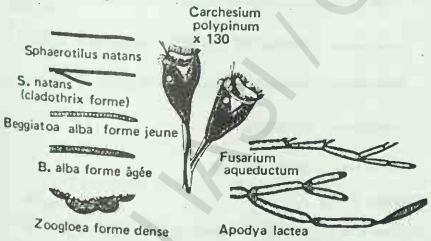


Figure 6.11
Quelques espèces de décomposeurs fréquentes dans les eaux fortement polluées par des matières organiques. D'après Hynes 1960, p. 99

PUMAGI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Fusarium aqueductum est un ascomycète très abondant dans les eaux riches en matières organiques où il constitue des colonies de couleur rouge brique.

Bien d'autres espèces de champignons appartenant aux genres *Mucor, Geotrichum, Penicillium,* etc. pullulent dans les eaux contaminées par des substances biochimiques.

La prolifération de ces organismes dans la zone de décomposition active provoque des bouleversements dans les conditions écologiques du milieu (cf. fig. 6.10 A et B).

Leur action se traduit inéluctablement par une chute brutale de la teneur en oxygène dissous. Cette conséquence de la pollution organique des eaux fut étudiée, semble-t-il pour la première fois, par le Français Dupré (1884). Cet auteur concluait dans son mémoire que la décroissance du taux d'oxygène dissous résultait de la prolifération de "microphytes" qui l'utilisaient pour assurer leurs besoins métaboliques (d'après Gaudy, 1972). La DBO_5 constitue un paramètre essentiel pour caractériser cette consommation massive d'oxygène due à la prolifération des bactéries hétérotrophes. Celle-ci croît initialement de façon exponentielle (fig. 6.12 A). Elle atteint ensuite un maximum puis décroît lentement au fur et à mesure que progresse l'élimination ou plutôt la consommation par les bactéries hétérotrophes de la matière organique. La décroissance de la DBO est très nette dans un cours d'eau lorsque l'on s'éloigne vers l'aval à partir du point de rejet.

Le taux d'oxygène dissous, présent à un instant t ou à une distance donnée de l'émissaire polluant, résultera de deux facteurs antagonistes, la DBO et le taux de dissolution dans l'eau de ce gaz auquel s'ajoute la reprise d'activité des bactéries autotrophes, qui participent à la réoxygénation des eaux.

La variation du taux d'oxygène dissous en fonction de la distance par rapport au point de déversement, ou en un point donné et en milieu fermé, à partir du moment où s'est produite la pollution, est directement liée à celle de la DBO.

La courbe représentant la variation de ce taux en fonction de ces deux variables revêt un aspect dit "en sac" (fig. 6.10 A et fig. 6.12 A).

En réalité, la variation de la DBO est moins régulière que l'on pourrait le penser. En effet, celle-ci exprime l'activité respiratoire (ou catabolique), non seulement des décomposeurs, mais de tous les hétérotrophes présents dans l'eau polluée. Or existent, dans la zone de décomposition active et dans celle qui lui succède vers l'aval (ou dans le temps) lorsque le pouvoir autoépurateur commence à faire son effet, des conditions écologiques favorables à la prolifération de protozoaires, dont un grand nombre d'espèces se nourrissent de bactéries. Certes, aux alentours du point de rejet, seuls des micro-organismes très résistants et quelques flagellés peuvent se développer. Mais au-delà de cette zone, se mettent à pulluler des ciliés des genres *Colpidium, Glaucoma, Penicillium,*

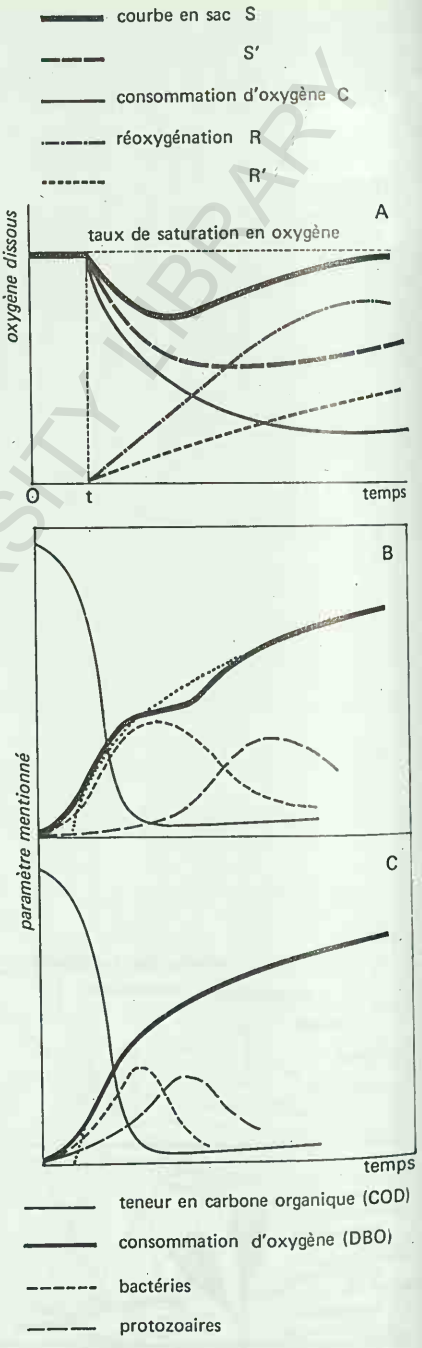


Figure 6.12
Influence de la pollution organique des eaux sur la teneur en oxygène dissous et leur demande biochimique en oxygène (B et C). Explications dans le texte. A, d'après Colas 1968, B et C d'après Gaudy in *Mitchell "Water pollution microbiology" Wiley ed. 1972, p. 320*

BOSTON COLLEGE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

ainsi que des espèces sessiles *(Carchesium, Epistylis)* à régime bactériophage (fig. 6.11).

La respiration de ces animaux intervient aussi dans la DBO. Elle prend le relai de celle des bactéries dont le nombre décroît, pour consommer l'oxygène dissous. Si le décalage est trop grand entre les optimums de densité des populations de ces deux groupes d'organismes, on observe un plateau dans la DBO (fig. 6.12 B).

L'activité des décomposeurs va se traduire par l'apparition d'ammoniaque et parfois d'hydrogène sulfuré dans les eaux, ainsi que de phosphates minéraux, terme ultime de la dégradation des nucléotides et autres dérivés phosphorés de nature biochimique.

Quand le taux d'oxygène aura remonté à une valeur convenable pourront intervenir les bactéries nitrifiantes qui convertiront l'ammoniac en nitrates selon la réaction (1)

$$2\,NH_3 + 4\,O_2 \rightarrow 2\,NO_3^- + 2\,H^+ + 2\,H_2O. \qquad (1)$$

Ceci explique le décalage du pic "nitrates" de la figure 6.10 B.

Les algues disparaissent totalement des eaux désoxygénées par une pollution organique. Cependant, si le taux d'oxygène reste suffisant, on constate que les algues, d'abord réduites en nombre, se mettent à pulluler. La prolifération de ces organismes autotrophes résulte de la libération des nitrates et phosphates par les décomposeurs, à partir de la matière organique présente dans l'effluent ou que ce dernier renfermait à l'état dissous (détersifs, engrais chimiques). On constate que le maximum de densité de la phytocœnose alguale est atteint à quelque distance du point d'émission (fig. 6.10 C). Les espèces qui prolifèrent ainsi sont adaptées à des milieux très riches en éléments nutritifs : *Oscillatoria, Phormidium* (algues bleues), *Ulothrix* (algue verte), *Euglena* (phytoflagellé). Dans les eaux surchargées en nitrates s'observe souvent une algue verte *Stigeoclonium tenue* (fig. 6.13).

Certaines diatomées comme *Gomphonema parvulum* et *Nitzschia palea* et des *Melosira* se rencontrent en grande abon-

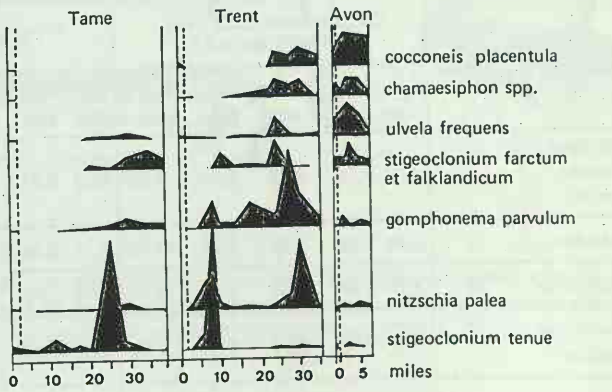


Figure 6.13
Changements dans la flore alguale contenue dans un prélèvement d'eaux polluées par des matières organiques et cultivée in vitro. *Ici sont étudiées les flores de 3 rivières : Tame, Trent et Avon, le pointillé figurant la position des émissaires polluants* (in *Hynes 1960, p. 104)*

dance, même dans la zone de décomposition active, avec parfois des espèces des genres *Navicula* et *Surirella.* Une mention particulière doit être faite de l'algue verte *Cladophora glomerata,* très fréquente dans les eaux riches en éléments nutritifs. Cette espèce ne prolifère qu'à partir du moment où un certain degré de minéralisation de la matière organique est déjà atteint. Elle peut y pulluler sous forme de filaments ramifiés qui dépassent deux mètres de longueur et constituent des masses flottantes vert sombre. Celles-ci peuvent s'étendre sur des kilomètres vers l'aval.

Dans la zone de récupération on remarque aussi la présence d'algues vertes du groupe des *Spirogyra* et des phytoflagelles coloniaux du genre *Pandorina* (fig. 6.9).

Lorsque le pouvoir autoépurateur du milieu a achevé son action, les conditions initiales sont restituées et l'on observe une phytocœnose d'eaux propres (fig. 6.9 et 6.10).

Wuhrman (1972) a proposé de mesurer le pouvoir autoépurateur par le coefficient S_e donné par la relation (2) :

$$S_e = \frac{S_m}{G} = \frac{Q\,(C_o - C_u)}{t\,(g'\,Pv + g''\,Q)}\,(\text{Mole g}^{-1}.\,\text{s}^{-1}) \qquad (2)$$

où S_m est le taux d'autoépuration (en Moles^{-1}) ; Q le débit en m^3/s ; C_o et C_u les concentrations en matières organiques au point d'émission et à la fin du processus d'autoépuration ; t le temps total pendant lequel se déroule le phénomène ; G la biomasse totale, g' la biomasse benthique (en g/m^2), g'' la biomasse en suspension (en g/m^3) ; P la longueur du profil de la section transverse (en m) et v la vitesse du courant (en m/s).

L'application de cette expression à diverses phytocœnoses saprophytiques lui a permis de calculer leur pouvoir autoépurateur (Tableau XLV).

Tableau XLV — Activité autoépuratrice de diverses phytocœnoses saprophytiques

Organismes dominants	*Température en* 0°C	*Concentration dans l'eau en* µM/l					S_e en 10^{-3} µM/g/s				
		Glucose	Fructose	Saccharose	Galactose	Sucres totaux	Glucose	Fructose	Saccharose	Galactose	Sucres totaux
Diatomées *(Diatoma hiemale)*	7	2,22	2,12	2,20	2,04	8,58	0,22	0,24	0,08	0,04	0,58
Cladophora	15	2,96	2,85	3,08	2,79	11,68	0,12	0,38	0,88	0,09	1,47
Sphaerotilus	15	3,25	2,96	3,36	3,41	12,68	2,09	1,98	1,14	4,55	9,76
Sphaerotilus + *Fusarium*	7	2,56	2,38	2,57	2,44	9,95	0,34	0,13	0,60	0,12	1,19

BCU IASI / CENTRUL DE RESURSE UNIVERSITY LIBRARY

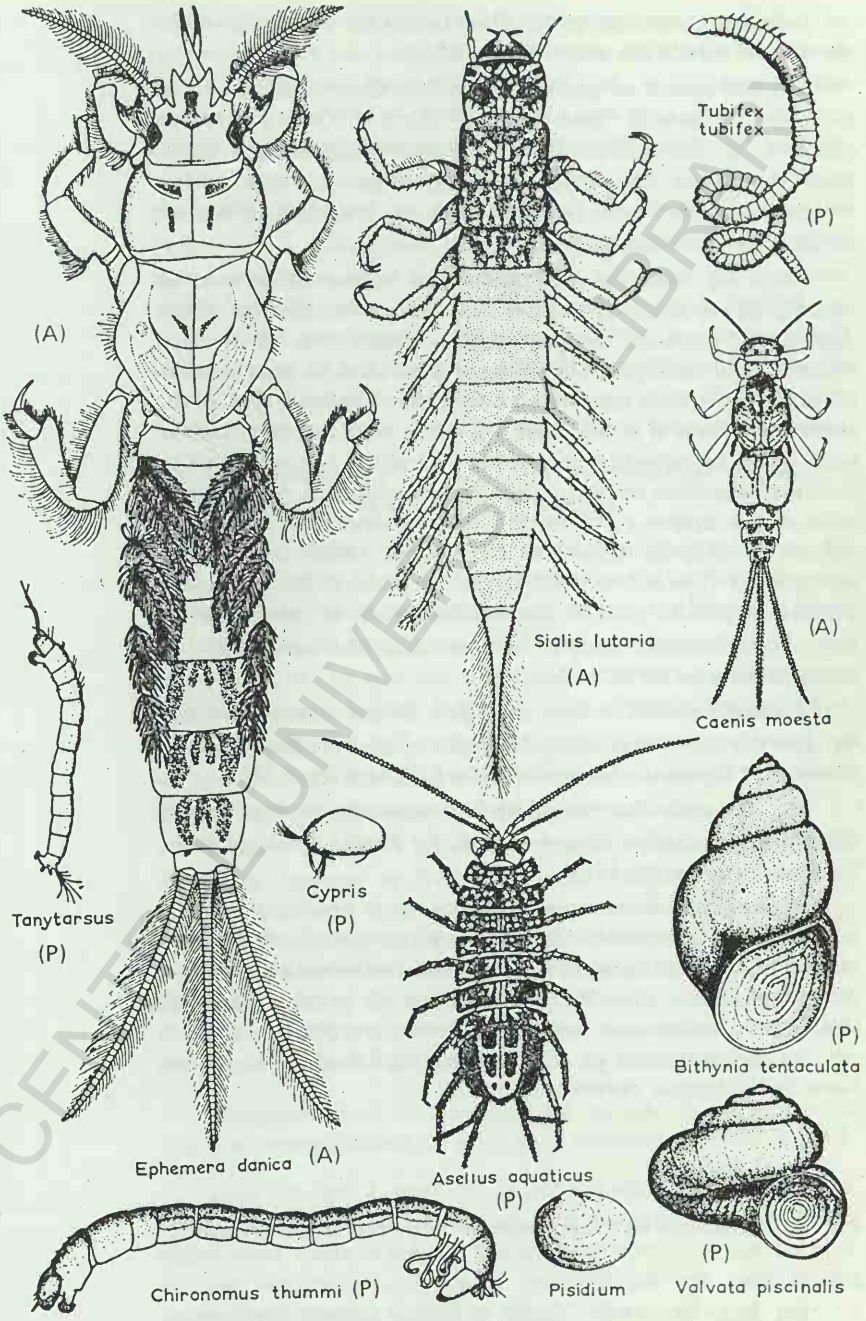


Figure 6.14
Quelques invertébrés du benthos en milieu limnique. Les espèces marquées de la lettre A ne se rencontrent qu'en eaux pures, celles affectées de la lettre P sont bioindicatrices de pollution. D'après Hynes 1960, p. 37.

BCU IASI / CENTRE UNIVERSITAIRE

Les zooccœnoses lotiques subissent aussi un complet bouleversement à la suite d'une pollution organique.

Aucune espèce de poisson, aucun invertébré d'eaux pures, ne peut survivre dans la "zone septique" (fig. 6.9). On y observe, en revanche, la prolifération d'espèces animales adaptées aux conditions écologiques très particulières qui y règnent : grande richesse en matières organiques fermentescibles et important déficit en oxygène, entre autres facteurs.

Dans les vases qui sédimentent au niveau de la zone de décomposition active prolifèrent des larves d'insectes de régime saprophage, pourvues de longs siphons respiratoires (*Eristalis* et *Psychoda,* par exemple). On remarque aussi dans les vases putrides de petits oligochètes appartenant aux genres *Tubifex* (fig. 6.14) et *Limnodrilus* dont la présence est d'une telle constance dans ces milieux qu'on les considère comme des indicateurs biologiques de la pollution organique des eaux. On a dénombré jusqu'à 400 000 individus de ces espèces au mètre carré dans les limons des cours d'eau contaminés (d'après Richardson dans Hynes, 1960). Dans la zone septique des rivières très polluées par des matières fermentescibles s'observent parfois aussi de nombreuses larves de moustiques du genre *Culex* lesquelles se nourrissent aux dépens des algues microscopiques qui s'y développent.

Lorsque remonte le taux d'oxygène dissous apparaissent dans les vases d'innombrables larves de Diptères Chironomides du groupe *Chirononus thumni* (= *riparius*) (cf. fig. 6.10 D et fig. 6.14).

On rencontre avec beaucoup de régularité, dans la zone à *Cladophora* auxquelles ils sont associés, les *Asellus aquaticus,* petits crustacés isopodes (fig. 6.14).

Plus en aval, on entre dans la zone où le pouvoir autoépurateur du milieu a pu rétablir des conditions comparables à celles qui régnaient en amont du point d'émission du polluant. On y retrouve une faune d'eaux propres caractérisée par la présence de larves d'insectes inféodées aux facies normalement oxygénés : (larves de perlides, de phryganes et d'éphémères (fig. 6.9 et 6.14), et une faune ichtyologique normale.

Pollution organique en milieu lentique : l'eutrophisation des lacs

Les lacs, les marais, étangs et autres milieux lentiques se caractérisent par de vastes surfaces d'eaux dormantes dont le volume est considérable par rapport à leur vitesse d'écoulement. En conséquence, leur renouvellement et leur oxygénation ne s'effectuent qu'avec lenteur. Le Rhône met par exemple dix ans pour remplacer entièrement les eaux du Léman. Cette durée est encore plus longue pour certains grands lacs continentaux. Certains sont

BUCAREST / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

même dépourvus d'émissaire, de sorte que leurs eaux ne se renouvellent que par évaporation. Tel est le cas du lac Nakuru au Kenya, du Tchad, des chotts sahariens, etc. et de mers fermées comme la mer d'Aral ou la Caspienne. Leurs eaux tendent progressivement à se surcharger en sels dissous apportés par les affluents.

Les lacs sont inéluctablement appelés à disparaître par comblement à la suite d'apport de matériaux par l'érosion du bassin versant et de phénomènes liés à la multiplication des végétaux et autres organismes de la biocoenose qu'ils hébergent. Ce processus, appelé eutrophisation, résulte d'un accroissement de fertilité des eaux du lac par apport d'éléments nutritifs, en particulier de phosphates et de nitrates qui favorisent la prolifération du phytoplancton et des plantes aquatiques. Peu à peu, ce processus accélère la sédimentation : le lac se rétrécit, se comble et finit par disparaître.

Ce processus est très lent dans les conditions naturelles, il s'accomplit à l'échelle des temps géologiques.

Dans la plupart des pays tempérés, les lacs proviennent des époques glaciaires. Ils se sont constitués à la fin du Pléistocène, au moment de la fusion des banquises et de leur retrait vers le Nord.

Les jeunes lacs, relativement profonds, sont pauvres en éléments nutritifs. Ils sont dits oligotrophes. Ils ne peuvent héberger qu'une biomasse végétale restreinte et leur productivité est faible.

Tandis que l'érosion amène progressivement aux eaux du lac les sels minéraux indispensables, les sols des terres qui l'entourent se stabilisent par croissance de la végétation ripicole.

Pendant que croît la production primaire des eaux et que la biocœnose lentique se diversifie, l'apport d'éléments nutritifs au lac n'est pas pour autant arrêtée par la stabilisation du bassin versant, mais il s'effectue à un rythme constant. L'écosystème lacustre est alors entré dans une période d'équilibre qui peut durer des dizaines, voire des centaines de milliers d'années. L'apport de matériaux est entièrement consommé par la production biologique entretenue par une importante biomasse animale et végétale.

Cependant, tout au long de cette période, le lac devient de moins en moins profond par suite de la sédimentation (fig. 6.15 B).

Dans un lac à maturité en état d'équilibre on remarque, pendant la belle saison, l'apparition d'un thermocline (fig. 6.16) qui sépare deux zones stratifiées, la supérieure constituée par des eaux chaudes (épilimnion), la couche profonde par des eaux froides denses (hypolimnion).

Mais peu à peu, la remontée du fond va mettre un terme à cette stratification, de sorte que les eaux profondes vont subir d'importants changements. Il va se produire un accroissement considérable de la surface immergée, sur laquelle pourront se développer les plantes aquatiques (fig. 6.15 C). Lorsque la profondeur n'est plus suffisante, la stratification deviendra impossible.

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

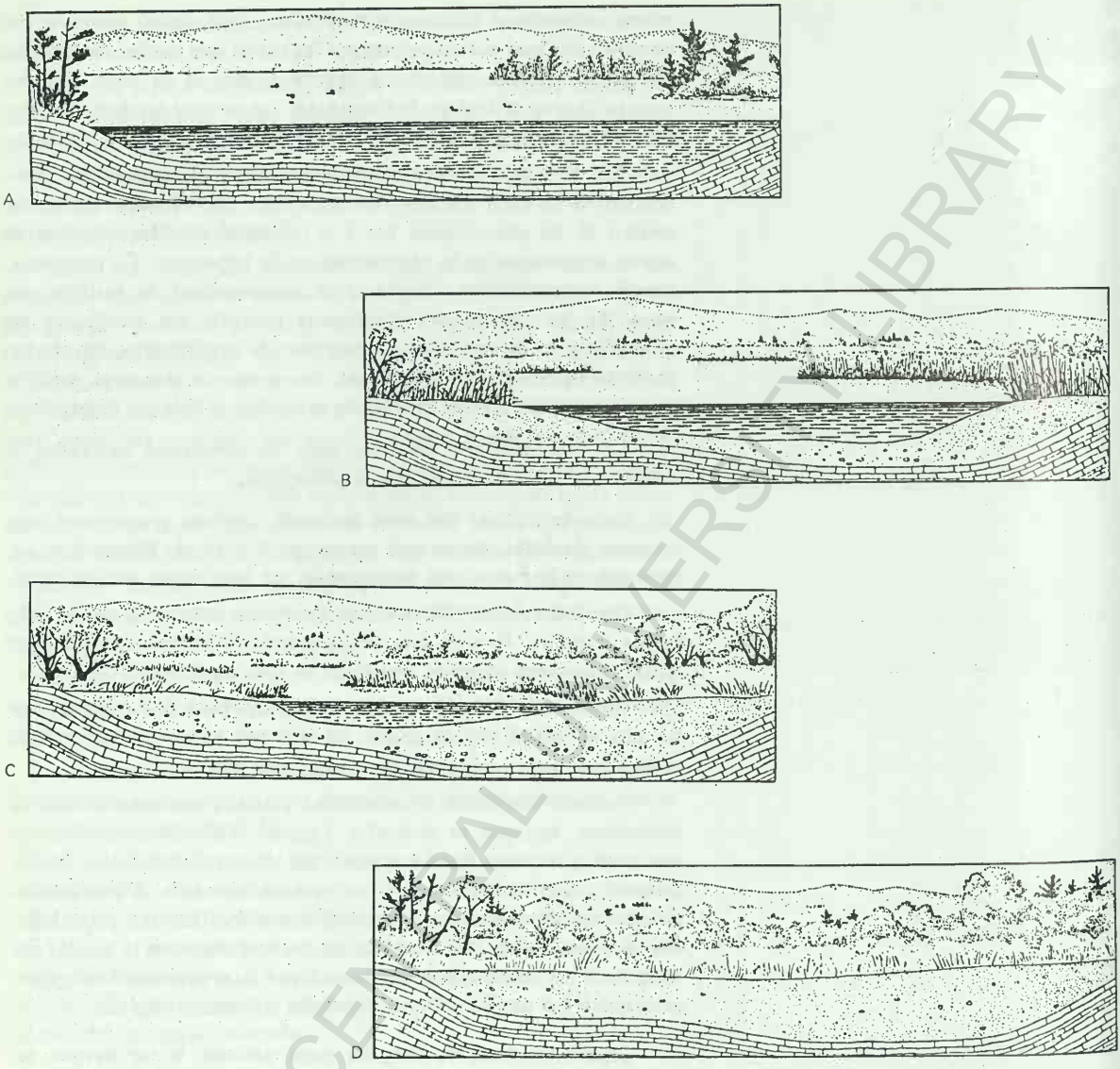


Figure 6.15
Vieillissement d'un lac. A – lac jeune, oligotrophe, B – Augmentation de la biomasse, peuplement des rives par la végétation, dépôt de sédiments, C – lac âgé, entrophe, D – comblement final. D'après Powers et Robertson, Scientific American, nov. 1966

L'agitation des eaux due au vent mélangera les couches et homogénéisera leur température. Il s'ensuivra un accroissement de productivité primaire et une accélération de la colonisation des eaux lacustres par les macrophytes, tandis que la végétation terrestre gagnera sur ses bords. Le lac est alors dit eutrophe.

Enfin, au terme de son évolution, il sera entièrement comblé et se transformera en une étendue marécageuse (fig. 6.15 D).

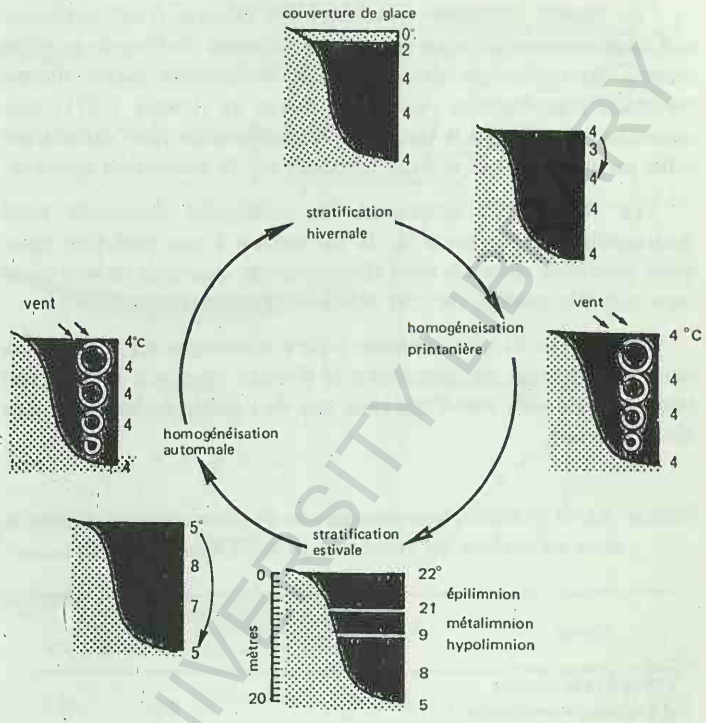


Figure 6.16
Cycle thermique annuel dans un lac de région tempérée. D'après Welch, "Limnology", Mac Graw Hill 1952, mais modifié

Cependant, avant que ne disparaisse la stratification, le lac présentera d'importants changements au niveau de l'hypolimnion. La dégradation de la matière organique, qui s'est accumulée en grande quantité dans les limons benthiques va consommer d'importants volumes d'oxygène dissous. Les eaux profondes peuvent même devenir anaérobies et impropres à toute vie animale. Ceci peut survenir non seulement dans les écosystèmes limniques mais aussi en milieu marin. Ainsi, les eaux d'une mer fermée comme la mer Noire sont entièrement dépourvues d'oxygène à partir de 200 m de profondeur (Neuman dans Deuser, 1970).

On appelle eutrophisation le processus d'enrichissement des eaux lacustres (ou marines) par des sels minéraux.

L'homme accélère considérablement l'eutrophisation des eaux de nos jours car il déverse dans les lacs et les mers fermées des quantités considérables de matières organiques fermentescibles et d'effluents riches en phosphates (détersifs, engrais chimiques) et en nitrates.

Aujourd'hui, tous les grands lacs alpins et le plus vaste écosystème limnique du monde, celui des Grands Lacs Nord-américains, sont menacés ou en voie d'eutrophisation accélérée.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

En réalité, comparer le phénomène naturel d'eutrophisation aux conséquences du déversement par l'homme d'effluents putrides urbains ou industriels dans des eaux initialement pures choque beaucoup d'écologistes. Aussi, Mac Intyre et Holmes (1971) proposent-ils à juste titre le terme de dystrophisation pour caractériser cette perturbation des milieux lentiques par la civilisation moderne.

La figure 6.17 schématise les principales étapes de cette dystrophisation. Au stade A, le lac exposé à une pollution croissante accumule dans ses eaux d'importantes quantités de sels minéraux nutritifs amenés par des affluents d'origines diverses.

Le tableau XLVI représente à titre d'exemple les apports aux eaux superficielles de phosphore et d'azote minéraux dans le seul état du Wisconsin, aux Etats-Unis, qui fait partie du bassin versant des grands lacs.

Tableau XLVI — Estimation des apports de phosphore et d'azote aux eaux de surface du Wisconsin (d'après Hasler, 1970).

Source	N	P	N	P
	en 10^6 *livres/an*		*en % du Total*	
Effluents des stations d'épuration municipales	20	7	24,5	55,7
Egouts privés	4,8	0,28	5,9	2,2
Déchets industriels	1,5	0,1	1,8	0,8
Sources rurales Terres fertilisées	8,11	2,7	9,9	21,5
Autres terres cultivées	0,57	0,34	0,7	3,1
Forêts	0,435	0,043	0,5	0,3
Pâturages, pépinières et autres sols	0,54	0,36	0,7	2,9
Eaux souterraines	34,3	0,285	42,0	2,3
Ruissellement dans les villes	4,45	1,25	5,5	10,0
Précipitations dans le bassin collecteur	6,95	0,155	8,5	1,2
Total	81,66	12,56	100,0	100,0

D'autres estimations montrent qu'une agglomération de 150 000 habitants au km^2 apporte chaque année par mètre carré de surface lacustre 0,14 g de phosphore provenant des effluents urbains et 0,25 g dû aux activités agricoles (Vollenweider, 1968).

Parmi les diverses sources de nitrates, leur synthèse dans les moteurs à explosion mérite quelque attention puisqu'elle représente 5,5 % de l'apport total (tableau XLVI) azoté aux eaux de surfaces.

Au stade B, l'enrichissement des eaux en éléments nutritifs va déclencher la prolifération des algues dans l'épilimnion.

BU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

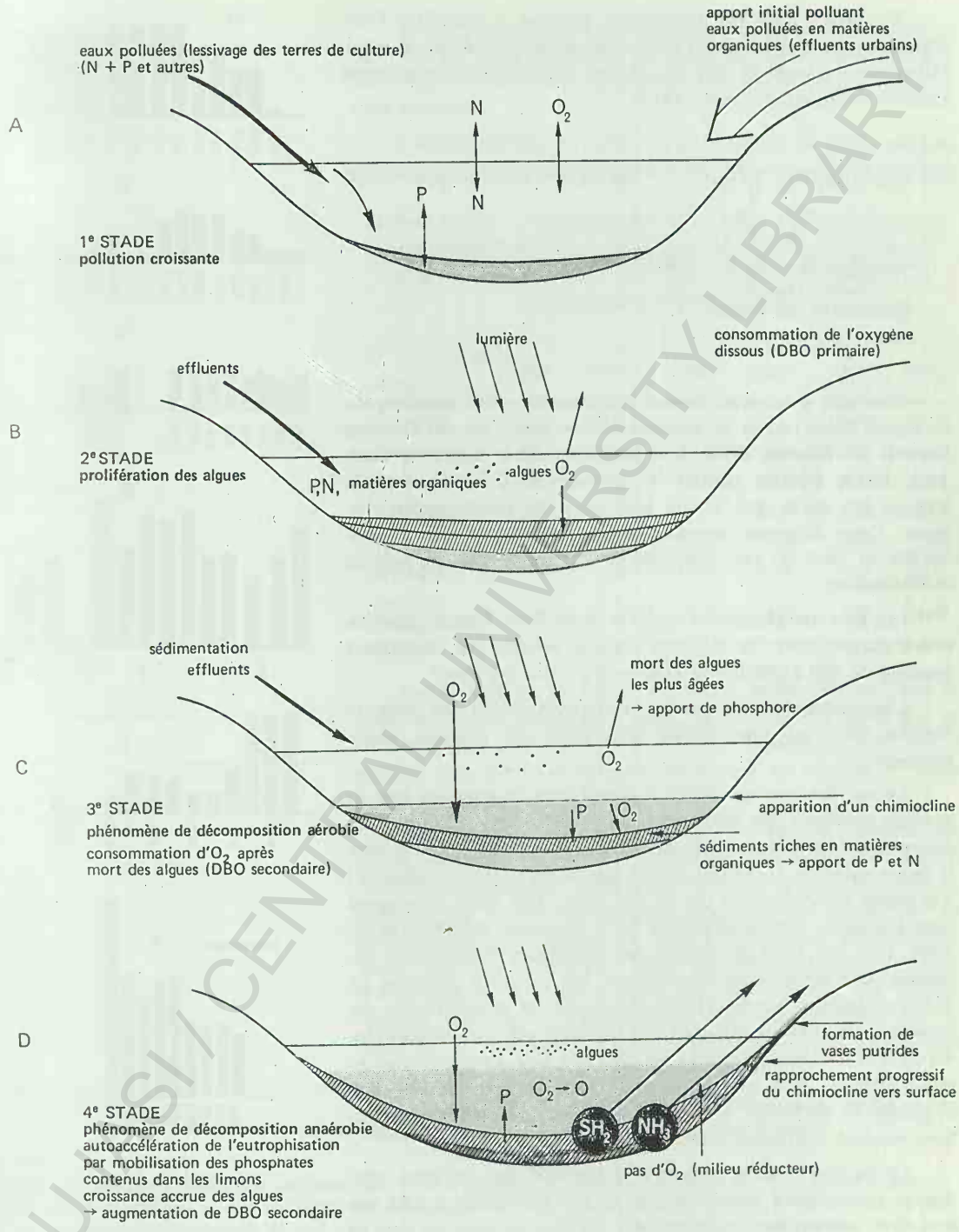
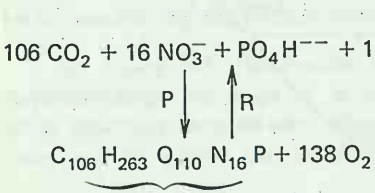


Figure 6.17
Schéma des principales phases de l'Eutrophisation des eaux en faciès lentique (explications dans le texte)

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

En effet, dans un écosystème lentique à maturité, l'état d'équilibre qui s'établit entre production photosynthétique et respiration peut s'exprimer par la relation stœchiométrique suivante (Stumm et Stumm-Zollinger, 1972) :



Une telle expression permet d'évaluer les effets possibles sur les algues d'une hausse de la concentration dans l'eau des éléments nutritifs (cf. Stumm, 1972). Si le phosphore est le facteur limitant, 1 mg de cet élément permet la synthèse de 0,1 g de biomasse d'algues (en poids sec) en un seul cycle de transformation limnique. Cette biomasse exercera, lorsqu'elle sera morte et sédimentée au fond du lac, une DBO secondaire de 140 mg pour sa minéralisation.

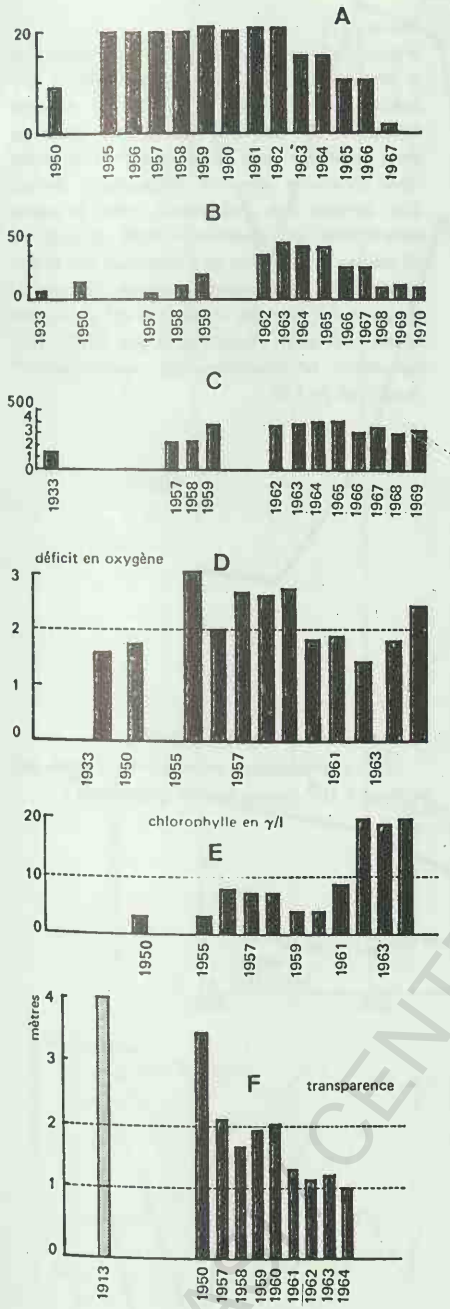
Les taux de phosphore compris entre 3 et 8 mg/l, que l'on relève souvent dans les effluents urbains, peuvent par conséquent produire de 300 à 800 mg de matière organique par litre !

L'eutrophisation ou plutôt la dystrophisation des eaux se traduira donc par une brutale pullulation des végétaux planctoniques.

Le cas des lacs de Zürich a donné pour la première fois un exemple saisissant des effets de l'apport d'éléments nutritifs à un écosystème limnique. La ville de Zürich déverse ses effluents dans le bassin inférieur (Untersee) tandis que le lac supérieur (Obersee) n'a jamais été contaminé par de tels rejets. Dès 1896 fut observé dans l'Untersee une prolifération de la diatomée *Tabellaria fenestrata.* Puis en 1920-24 apparut en abondance l'*Oscillatoria rubescens,* une algue bleue filamenteuse, qui se mit à proliférer en nombre immense. Minder (1938) comparant les phytocœnoses des deux lacs de Zürich remarquait que l'Obersee est resté oligotrophe. Au contraire, l'Untersee présentait alors une plus grande richesse en phytoplancton tant par la diversité des espèces que par leur biomasse, en particulier en aval du point où sont déversés les plus forts volumes d'effluents urbains.

Le lac Washington, fortement contaminé par les eaux résiduaires des stations d'épuration de la ville de Seattle, a subi une évolution comparable, quoique plus tardive, à celle du lac de Zürich. Edmondson (1971) signale que la première prolifération d'*Oscillatoria rubescens,* indice d'une sérieuse dystrophisation, fut signalée en 1955.

QUEEN'S GENERAL UNIVERSITY LIBRARY



Le lac Léman est aussi de nos jours en voie d'eutrophisation accélérée par suite des rejets des agglomérations riveraines. Pelletier (1968) fait état pour la première fois d'une éclosion d'*Oscillatoria rubescens.*

L'eutrophisation du Léman s'est traduite de façon générale par une profonde modification de sa flore alguale (Tableau XLVII).

Tableau XLVII — Variation dans la composition de la phytocœnose planctonique du Leman sous l'effet de l'eutrophisation (d'après Laurent, 1972). (en % du nombre total d'individus prélevés dans les échantillons).

Classe \ Année	1960	1962	1964	1966	1968	1970
Diatomées	97,71	98,5	83,67	78,5	65,80	63,12
Péridiniens	0,36	0,16	0,96	0,55	24,05	14,59
Chrysophycées	1,21	0,53	0,70	0,04	0,73	0,06
Xanthophycées	0	0	0	0,14	0,37	0
Cyanophycées	0,006	0,006	0,33	0,30	0,03	1,58
Conjugales	0,65	0,58	12,18	19,58	7,87	20,17
Autres chlorophycées	0,07	0,17	2,16	0,88	1,15	0,48

Les diatomées qui étaient largement prédominantes jusqu'en 1965 ont depuis diminué de façon significative, de même que les chrysophycées. Simultanément, le genre *Mougeotia* s'est mis à pulluler puis les Xanthophycées apparurent en nombre en 1966, suivies de peu par l'*Oscillatoria.*

La pullulation du phytoplancton au stade B présente une bonne corrélation avec l'enrichissement des eaux en éléments nutritifs, en particulier phosphates (fig. 6.17). L'augmentation considérable de la biomasse phytoplanctonique se traduit par un accroissement de turbidité des eaux à cette phase de l'eutrophisation. Celles-ci se chargent d'une quantité considérable d'algues microscopiques et filamenteuses qui leur confère une couleur verdâtre. Les eaux paraissent alors sales. Elles rejettent sur les bords du lac des masses d'algues qui s'entassent sur les grèves et dont la décomposition incommode les riverains.

La mesure de la concentration en chlorophylle fournit un bon indice de l'intensité de l'eutrophisation (fig. 6.18 E).

Figure 6.18
Modification des conditions écologiques observées dans le lac Washington en voie d'eutrophisation. En A est figurée la quantité d'effluents pollués rejetée par la ville de Seattle (en 10^6 1/jour) ; en B et C, les taux de phosphates, de nitrates des eaux de surface du lac (moyenne janvier-avril) en µg/l ; en D le déficit en oxygène ; en E le taux de chlorophylle dans les eaux de surface, qui donne une indication de la concentration de la flore alguale ; enfin en F, la diminution de transparence estimée par la profondeur maximale à laquelle on peut discerner un disque immergé de couleur blanche. (A, B et C d'après Edmondson in Murdoch "Environment, Resources, pollution and Society", Sinauer ed. 1971, p. 221 ; D, E, F d'après Edmondson "Water quality management and eutrophisation" Univ. Washington Press 1968, p. 130).

IOWA CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

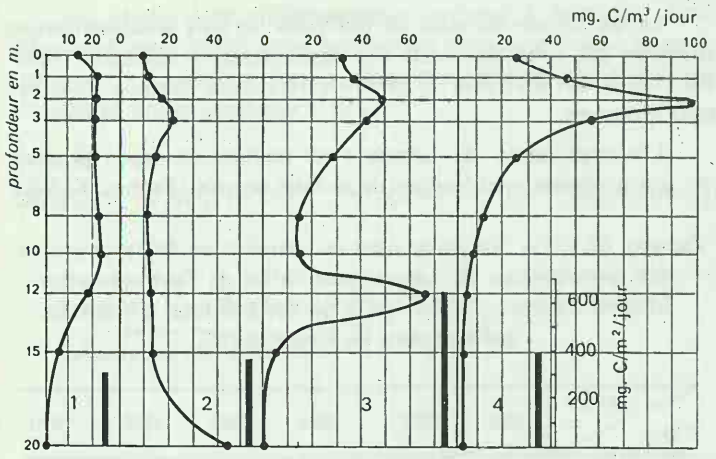


Figure 6.19
Intensité de la photosynthèse en fonction de la profondeur dans quatre lacs alpins (1. Millstätter, 2. Klopeiner, 3. Wörther et 4. partie inférieure du Lac de Constance). Dans les deux premiers lacs, la productivité primaire reste constante dans les 20 premiers mètres. Elle devient très importante dans la partie superficielle et quasiment nulle au-delà de 12 mètres dans le lac de Constance très eutrophisé. Les traits noirs verticaux figurent la productivité primaire totale par m^2 de surface lacustre. D'après Hasler in *Singer 1970 "Global effect of environmental contamination" Reidel ed. p. 116*

La surcharge du lac en matières végétales provoque une rapide diminution de sa transparence (fig. 6.18 F). Alors que dans un lac oligotrophe, l'activité photosynthétique se poursuit à plus de 30 m de profondeur, celle-ci va se concentrer dans les eaux eutrophes au niveau des premiers mètres au-dessous de la surface (fig. 6.19), qui seuls recevront un flux lumineux d'intensité suffisante.

Tous ces phénomènes vont concourir pour accroître le taux d'oxygène dissous dans les eaux superficielles du lac.

Au stade C, la mort de cette masse considérable d'algues (1) va provoquer la consommation rapide de l'oxygène contenu dans les couches profondes. Celles-ci subiront d'abord une dégradation aérobie qui sera l'œuvre de nombreux saprophytes.

La décomposition de la matière organique morte déterminera l'apparition d'un net gradient vertical dans la concentration d'oxygène dissous ; celui-ci sera délimité horizontalement par un chimiocline, au-dessus duquel les eaux seront riches en oxygène et au-dessous pauvres ou dépourvues de ce gaz (fig. 6.17C).

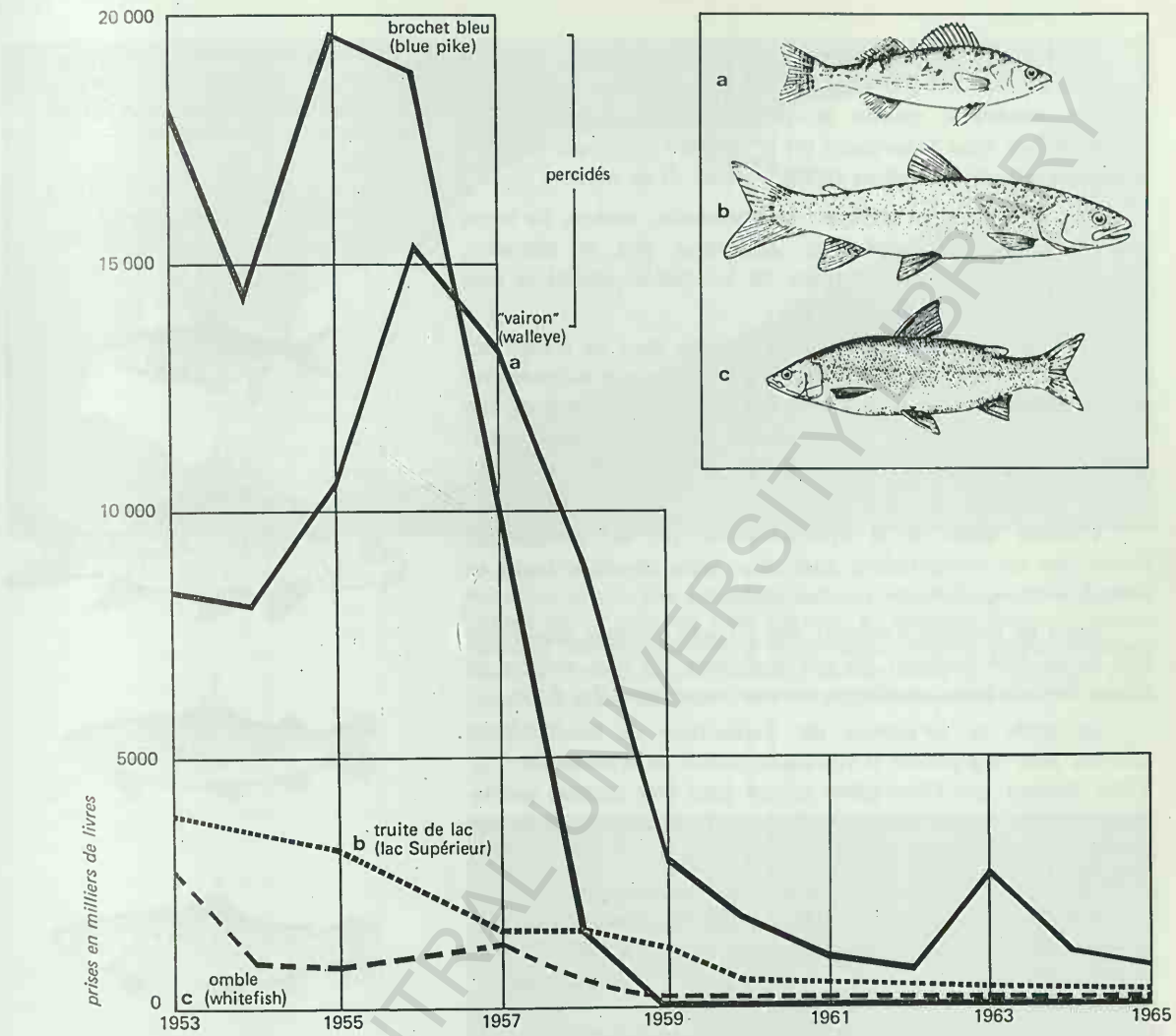
On remarque aussi à ce stade une accélération de la vitesse du dépôt des limons benthiques. Les couches récentes sont stratifiées et de couleur plus sombre que les sédiments anciens sous-jacents par suite de leur richesse accrue en matières organiques.

L'ensemble de ces modifications écologiques provoque aussi un bouleversement dans la zoocœnose lacustre.

L'appauvrissement de l'hypolimnion en oxygène se traduit par la disparition des salmonides, poissons nobles d'eaux propres, froides et bien oxygénées. (Fig. 6.20 et 6.21). Au contraire, les cyprinides, espèces frustes et de régime herbivore vont profiter de la surcharge des couches superficielles en matières végétales et ils supplanteront progressivement les salmonides.

Le déclin des espèces nobles sera à ce stade largement compensé par la forte hausse de productivité en cyprinides (fig. 6.21).

(1) La production primaire du Léman est estimée à 10^6 tonnes par an (poids sec) !



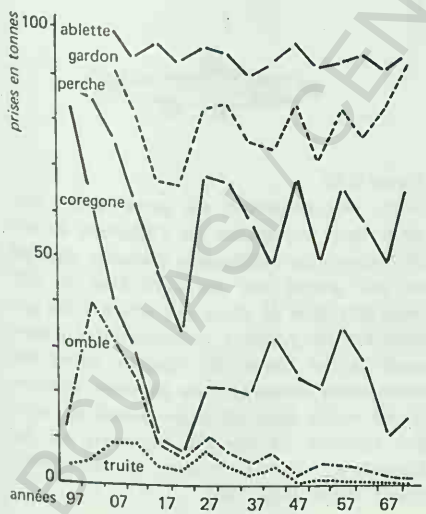


Figure 6.20

Chute de productivité des pêcheries dans les lacs Erié Supérieur et Michigan entre 1953 et 1965. La diminution observée provient non seulement de l'eutrophisation, mais aussi d'une modification de l'équilibre biocoenotique des consommateurs par introduction d'espèces de poissons étrangères à ces écosystèmes. Le Blue Pike et le Walleye (a) sont des Percides ; la truite de lac (b) était capturée dans les lacs supérieurs et Michigan ; le "White-fish" est un omble du lac Erié (c). D'après Powers et Robertson in *Scient. Amer., nov. 1966*

Figure 6.21

Variation de la productivité des pêcheries dans la partie française du Lac Léman, en voie d'eutrophisation, depuis 1897 jusqu'à nos jours. Alors que les Cyprinides, très tolérants, se sont maintenus, les Salmonides (Corégones, Ombles et Truite) espèces très exigeantes pour la qualité des eaux, mais aussi de haute valeur commerciale ont subi une régression spectaculaire. D'après Laurent, Jour. Fish. Res. Board. Canada, vol. 29, n° 6, 1972, p. 872

PCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dans le lac Léman, l'ablette (*Alburnus alburnus*), la brème (*Abramis brama*) et aussi le gardon (*Leuciscus rutilus*) sont de plus en plus nombreux, comme le montrent les statistiques (1) des pêcheries, qui nous renseignent sur la variation de l'importance des prises des principales espèces depuis le début de ce siècle.

Pendant la même période, les salmonides, espèces de haute valeur commerciale : corégones (*Coregonus fera* et *hiemalis*), ombles (*Salvelinus alpinus*), truite de lac (*Salmo trutta*), se sont considérablement raréfiés (fig. 6.21).

Une évolution comparable s'est produite dans les grands lacs américains, quoique ici des perturbations autres que la dystrophisation, telles l'introduction de la lamproie marine (*Petromyzon marinum*) et de l'alose, aient exercé une concurrence interspécifique défavorable à la plupart des espèces indigènes. (fig. 6.22).

L'ultime stade de la dystrophisation (D) est marqué par l'apparition de fermentations anaérobies après déplétion totale de l'oxygène dissous dans les couches profondes.

Selon de nombreux experts, des surfaces lacustres aussi vastes que le lac Erié évoluent de nos jours vers cet état, comme en atteste l'anoxie quasi absolue de ses eaux benthiques (fig. 6.23).

Ce stade se caractérise par l'apparition de fermentations putrides avec dégagement d'hydrogène sulfuré et d'ammoniac (fig. 6.24). Notons que l'hydrogène sulfuré peut être produit spontanément au fond de baies, voire de mers eutrophes. C'est par exemple le cas de la mer Noire (Deuser, 1970).

Même des mers aussi étendues que la Baltique peuvent être dystrophisées par l'action humaine au point d'atteindre le stade D, ainsi qu'en atteste l'évolution de son taux d'oxygène dissous (Tableau XLVIII).

Tableau XLVIII — Variation du taux d'oxygène dissous dans la Baltique à diverses profondeurs (d'après Environmental Research, Stockholm, 1968) en millilitre d'oxygène par litre d'eau.

Année	*Profondeur*		
	50 m	*100 m*	*200 m*
1903	7,7	2,5	2,3
1924	8,3	2,5	2,4
1955	8,7	1,5	1,5
1960	8,5	0,9	0,5
1965	8,6	0,5	0,3

On remarque dans ce tableau l'apparition du stade C de l'eutrophisation, caractérisé par la hausse du taux d'oxygène dissous en surface et sa baisse par suite des décompositions de la matière organique en profondeur vers une époque située au début des années 50.

(1) Celles-ci ne sont qu'un indicateur du niveau réel des populations ichtyennes car divers paramètres provoquent une distorsion, en particulier la variabilité de l'effort de pêche.

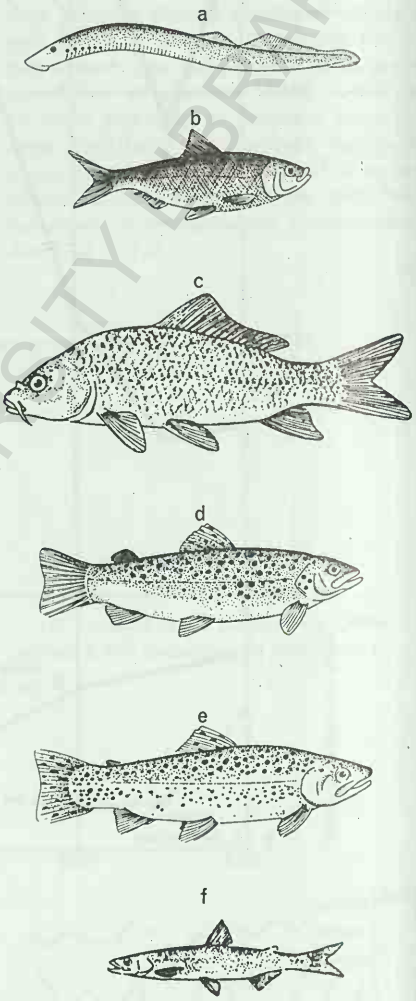


Figure 6.22
Outre l'eutrophisation, les perturbations biocœnotiques provoquées par l'irruption du fait de l'homme ou accidentelle d'espèces étrangères aux grands lacs ont aussi joué un rôle important dans la chute des effectifs des populations de poissons autochtones. La lamproie (a) et l'alose (b) figurent parmi ces envahisseurs accidentels. Au contraire, la carpe (c) les truites fario (d) et arc-en-ciel (e), ainsi que l'éperlan (f) ont été introduits par les Européens. D'après Powers et Robertson, Scient. Amer., nov. 1966

UNIVERSITY LIBRARY

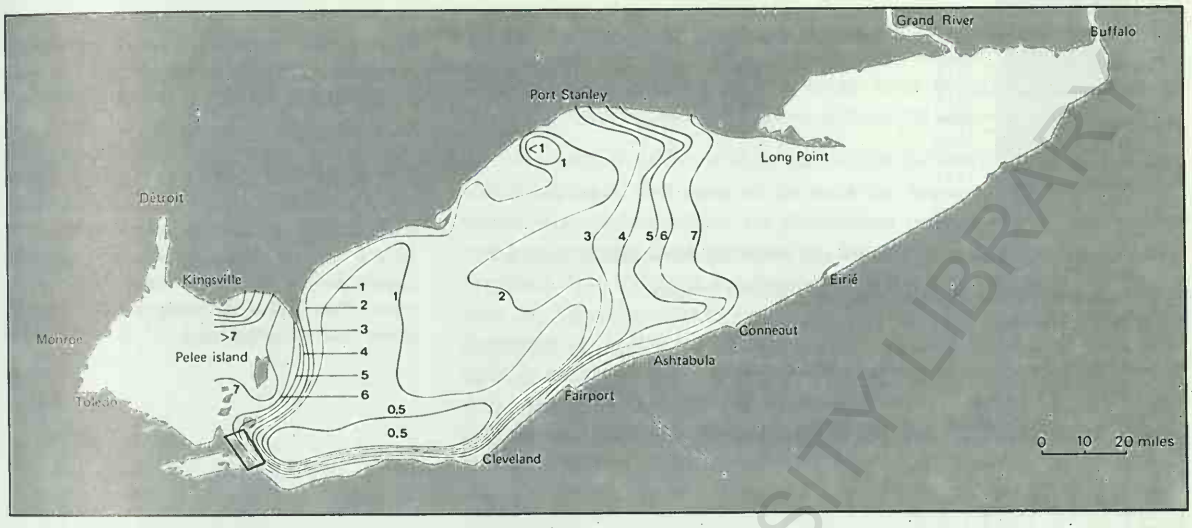


Figure 6.23
Répartition de l'oxygène dissous dans les eaux profondes du Lac Erié, fortement polluées par les rejets des villes riveraines, en particulier Détroit, Toledo et Cleveland. Dans la plus grande partie de la zone benthique, les eaux renferment moins de 3 g/l d'oxygène dissous et souvent moins de 1 g/l, signe d'une eutrophisation avancée. D'après Beeton 1963, Great lakes Commission technical report n° 6

Figure 6.23 bis
"Plume" de pollution dans le Lac Erié aux environs de Toledo. Sur cette vue aérienne prise d'une altitude de 10 km, on remarque un déversement d'eaux polluées à partir de la lagune bordée d'usines située au bas du cliché. Ces effluents, fortement contaminés augmentent sur plusieurs km la turbidité des eaux du Lac. Les limites de la région photographiée sont encadrées au bas de la carte précédente (Cliché F. Ramade)

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

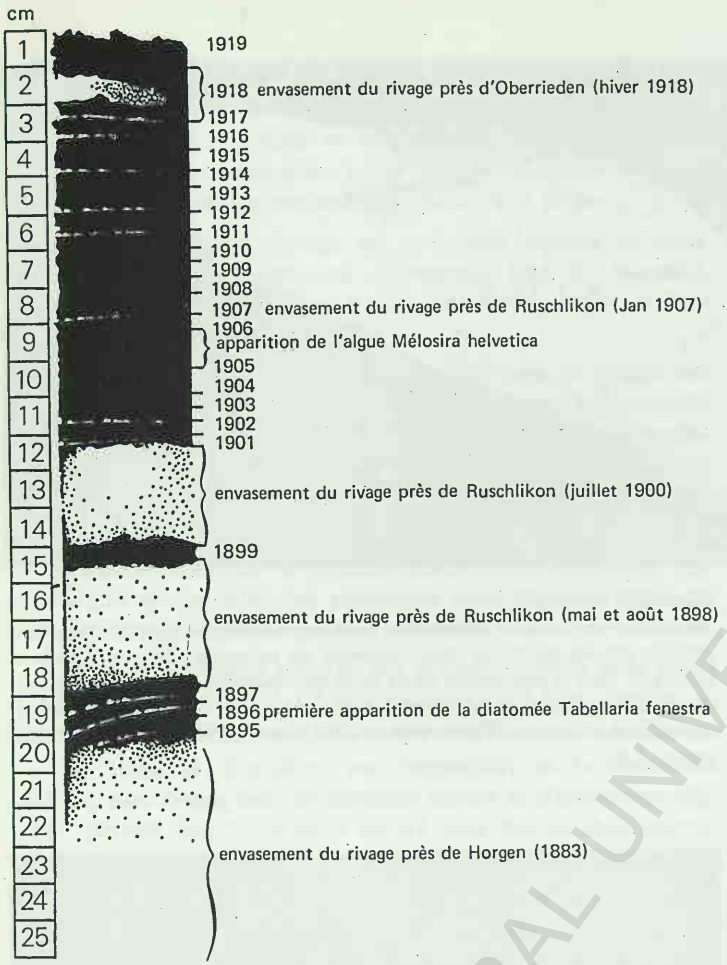
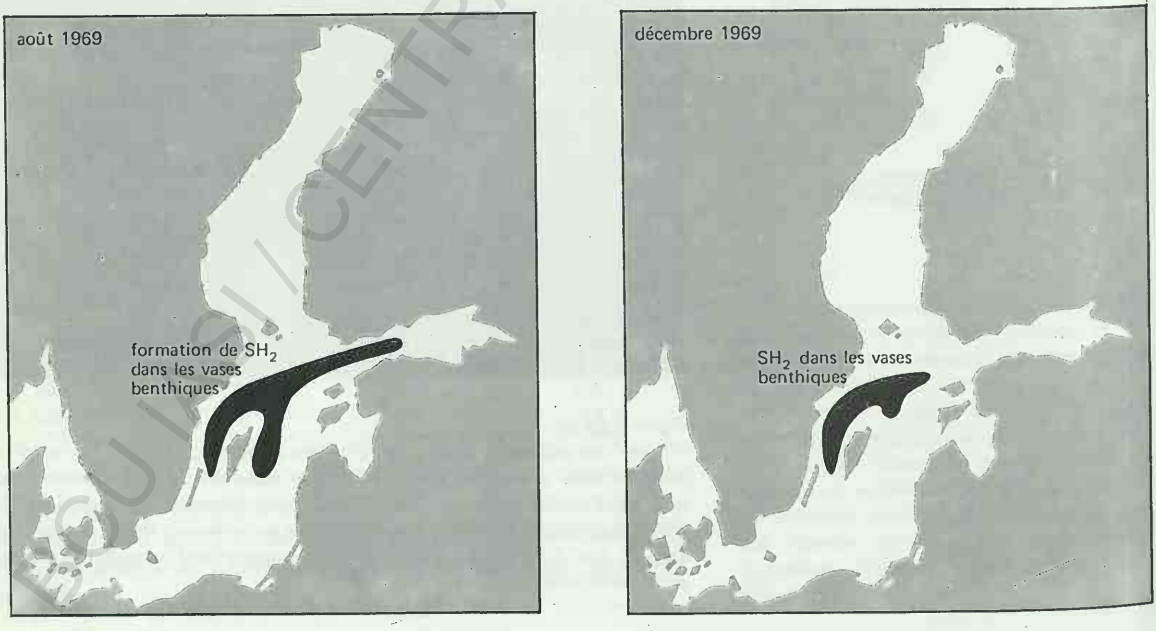


Figure 6.24
Changements provoqués par l'eutrophisation dans les couches superficielles des sédiments benthiques du lac de Zürich. L'apparition à partir de 1895 de conditions anaérobies s'est traduite par la fermentation putride des vases avec dégagement de SH_2 et dépôt de sulfure de fer noir. En été, les sédiments formés sont plus clairs à la suite de la précipitation de CO_3Ca due à l'élévation du pH des eaux consécutives à l'intense activité photosynthétique. D'après Nipkow in *Minder, Geologie der Meere und Binnengewasser, n° 2, 1938, p. 293*

Figure 6.25
L'eutrophisation de la mer Baltique. Malgré son étendue assez importante, cette mer présente aujourd'hui un état d'eutrophisation avancée. Depuis 1969, les sédiments benthiques sont le siège de fermentations putrides avec dégagement de SH_2 sur de grandes surfaces marquées en noir sur les cartes ci-dessous. L'ultime stade de l'eutrophisation est donc atteint. (In Barde et Garnier "L'environnement sans frontière : la Suède en question", Seghers 1971, p. 92)



EQUIPE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le stade D a été atteint à la fin de la dernière décennie, ainsi qu'en atteste le faible taux d'oxygène dissous déjà relevé en 1965 et, surtout, l'observation d'une immense zone benthique contaminée par des dégagements d'hydrogène sulfuré en août 1969 (fig. 6.25).

Au dernier stade, la dystrophisation des eaux prend une allure autocatalytique. Les vases et les eaux qui les surmontent, devenues réductrices, décomplexent les phosphates contenus dans l'ensemble matières organiques-phosphates-fer. La solubilisation de phosphates minéraux qui s'étaient accumulés dans les sédiments (1) va provoquer de nouvelles "explosions" de la flore algale, avec nouvelle surcharge en matières organiques. Les conditions écologiques vont devenir comparables à celles décrites en faciès lotique après pollution par des substances fermentescibles. Le milieu lacustre va évoluer vers un état septique semblable à celui décrit au paragraphe précédent (cf. p. 350).

(1) Cf. chapitre I, p. 61.

La zone benthique du lac Erié a atteint ce stade de dystrophisation, ainsi qu'en atteste l'apparition d'indicateurs biologiques qui caractérisent la zone septique. Ainsi, le nombre de *Tubificidae* s'élevait en moyenne à 5 950 individus/m^2 en 1961 contre 677 en 1930, celui des larves de tendipédides, diptères aux larves saprophages, est passé de 73/m^2 à 320/m^2 pendant la même période, alors que les larves d'éphémères, inféodées aux eaux propres (*Hexagenia* sp.) se raréfiaient de 139/m^2 à 1 individu/m^2 (d'après Carr et Hiltunen, 1965).

L'ultime stade de la dystrophisation peut donc conduire un écosystème limnique à un état septique, entièrement azoïque, à l'image de ce que l'on observe dans les cours d'eau surchargés d'effluents organiques.

Effets de la pollution chimique des eaux

Toxicité des principaux contaminants chimiques

Le phytoplancton et les macrophytes sont diversement affectés par la pollution des eaux selon la nature de l'agent contaminant.

Les sels de cuivre, les chromates sont fatals aux algues à des concentrations aussi faibles que la ppm.

De nombreux pesticides, en particulier tous les herbicides, sont très toxiques pour le phytoplancton.

Ukeles (1962) a testé les effets de ces substances sur les genres *Protococcus, Chlorella, Dunaliella, Phaeodactylum* et *Monochrysis*. Les herbicides du groupe des urées substituées (Monuron, Diuron) bloquent la croissance des phytoflagellés à des concentrations aussi faibles que 1 ppb ! D'autres recherches ont montré que le pichloram était encore plus toxique pour le phytoplancton marin. On s'interroge sur les conséquences qui peuvent résulter de l'usage de ces substances sur la productivité primaire des eaux.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Certains "experts" n'ont-ils pas conseillé l'emploi du monuron pour détruire les *Oscillatoria* qui pullulent en milieu eutrophisé ?

Fait étonnant, les insecticides sont aussi très nocifs pour le phytoplancton. Ainsi, le toxaphène arrête la croissance des genres précités de phytoflagellés à la dose de 7 ppb.

La diminution de productivité d'une communauté phytoplanctonique à *Platymonas* et *Dunaliella* exposée à une concentration de 1 ppm pendant 4 h. est de 29 % pour le lindane, 77 % pour le DDT et 95 % pour le chlordane (cf. tableau LI, p. 369).

On a pu montrer que le DDT et d'autres insecticides inhibaient la photosynthèse chez les organismes phytoplanctoniques (Wurster, 1968). (fig. 6.26).

Si la contamination des eaux marines du plateau continental par les insecticides organochlorés et autres pesticides continue à s'accroître au rythme actuel, leurs effets sur la productivité primaire constitue une perspective bien inquiétante. Elle laisse entrevoir la possibilité d'une diminution de la quantité de matières protéiques disponibles dans les océans pour l'alimentation humaine. La régression de la biomasse phytoplanctonique déterminera infailliblement une réduction des effectifs de poissons du plateau continental.

Les détersifs synthétiques sont très toxiques pour la flore microbienne des eaux. Leurs effets inhibiteurs sur les bactéries aérobies soulèvent de sérieux problèmes pour le traitement des effluents dans les stations d'épuration quand leur concentration est trop élevée, car ils entravent l'activité des lits bactériens.

Les invertébrés et les vertébrés dulçaquicoles et marins sont victimes des innombrables substances chimiques rejetées dans les eaux par l'industrie.

La sensibilité extraordinaire des poissons à certains polluants, sans doute liée aux particularités de la circulation branchiale, les a fait utiliser dans les tests biologiques de pollution.

En Grande-Bretagne, le test-poisson consiste à plonger un téléostéen d'eau douce dans une eau contaminée et à mesurer le nombre de minutes de survie de l'espèce considérée.

L'indice de toxicité de l'eau t est évalué par la relation suivante :

$$t = \frac{1}{100\,n}$$

où n est égal au nombre de minutes de survie.

Les principaux paramètres toxicologiques utilisés pour déterminer les effets d'un polluant sur des animaux limniques ou marins sont la CL 50, la CL 100, le TL_M et le TL 50.

Les deux premiers paramètres (concentration léthale) indiquent les concentrations susceptibles de faire périr 50 ou 100 % d'une population animale en 24 h ou 48 h (ou une autre durée prédéterminée).

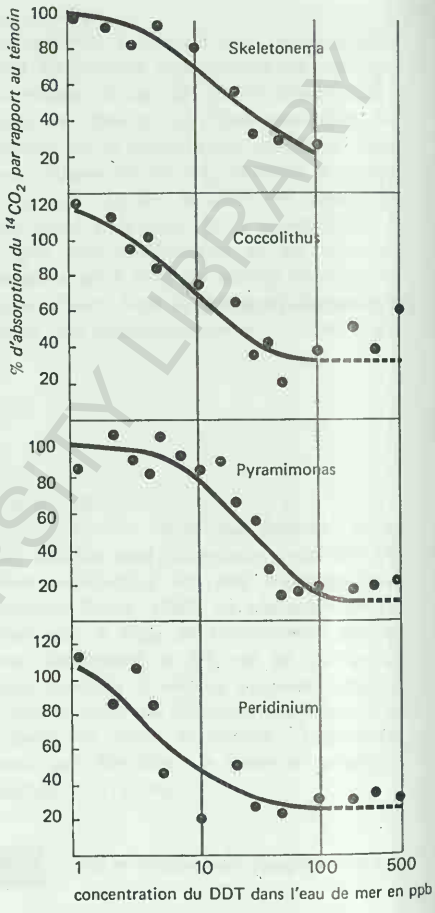
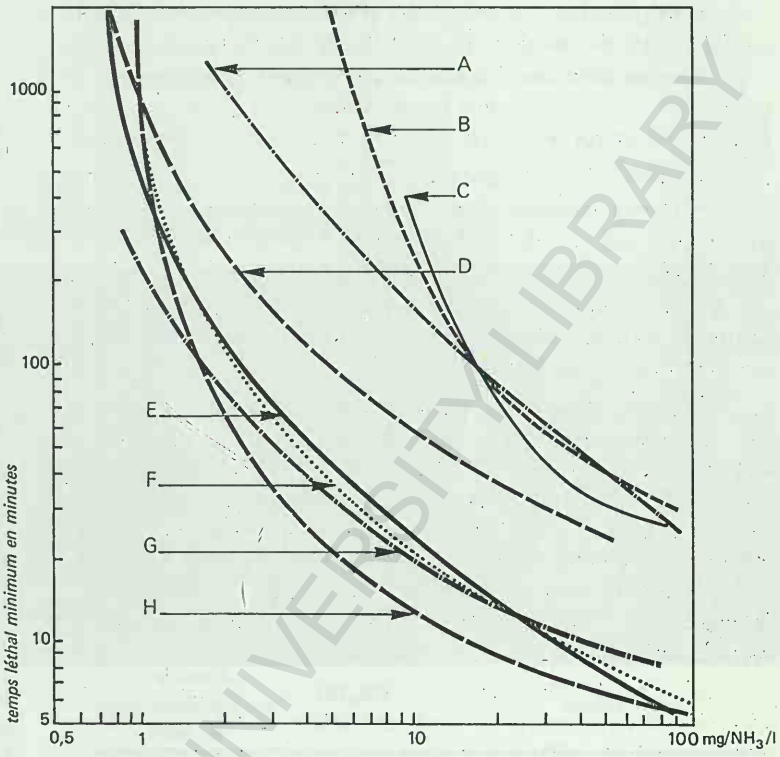


Figure 6.26
Influence de concentrations croissantes de DDT dans l'eau de mer sur l'activité photosynthétique de diverses espèces du phytoplancton. En ordonnée est figurée la diminution du $^{14}CO_2$ absorbé par rapport au témoin de l'espèce correspondante. D'après Wurster in *Science, vol. 159, 1968, p. 1474*

BUNASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



A – perche soleil *(Eupomotis gibbosus)*
B – larve d'éphémère *(Ecdyonurus sp.)*
C – gammare (crustacé) *(Gammarus pulex)*
D – truite fario *(Trutta fario)*
E – chevaine *(Squalius cephalus)*
F – vairon *(Phoxinus laevis)*
G – truite arc en ciel *(Salmo gairdnerii)*
H – perche *(Perca fluviatilis)*

Figure 6.27
Courbes de toxicité de l'ammoniaque pour divers téléostéens et invertébrés d'eau douce. D'après Wuhrman et Woker in *Marcuzzi "Ecologia animale", Feltrinelli ed., p. 691*

(1) Léthal = mortel.

Le TL_M est le temps léthal (1) moyen pour une concentration faisant périr tous les individus de la population et le TL 50, le temps théorique après lequel 50 % des individus de la population ont péri sous l'effet d'une concentration supérieure à la CL 50.

Les tableaux XLIX et L figurent à titre d'exemple les CL 50 de diverses substances polluantes et les concentrations d'NH_4OH et de cyanure dont le TL_M est de 1 000 minutes pour diverses espèces de téléostéens et d'invertébrés dulçaquicoles. (fig. 6,27).

Les valeurs figurées dans le tableau XLIX sont des indications moyennes. Elles sont dans l'ensemble plus faibles pour les salmonides, et supérieures pour les tanches et autres cyprinides, espèces assez tolérantes à la pollution des eaux. Par ailleurs, ces valeurs ont été relevées en eaux calcaires qui atténuent les effets des toxiques cités. Elles seraient en moyenne à diviser par 20 en eaux pures.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau XLIX – Dose limite tolérable et concentration minimale provoquant 100 % de mortalité (CL 100) relevée comme valeur moyenne pour les téléostéens d'eaux douces (d'après divers auteurs dans Furon, 1962)

Substance	*Dose limite tolérée* (en ppm)	CL 100 (en ppm)
HCl	75	200
HNO_3	200	750
H_2SO_3 (papeteries)	0,5	1
NH_4OH	13	25
$CuSO_4$	50	100
Phénol	1	10
Chromate de potassium	0,1	0,5
Cyanure de potassium	0,1	0,5
"Manoxol" (détersif)*	0,4	8,5

* Cité dans Marcuzzi (1968).

Tableau L – Sensibilité à l'ammoniaque et au cyanure de divers téléostéens et invertébrés limniques (d'après divers auteurs dans Marcuzzi).

Espèce	NH_4OH (en mg/l)	*Cyanure* (en équivalent azote en mg/l)
Truite arc en ciel *(Salmo gairdnerii)*	0,6	0,08
Vairon *(Phoxinus laevis)*	0,9	0,1
Chevaine *(Squalius cephalus)*	0,8	0,24
Perche *(Perca fluviatilis)*	1,0	0,13
Tanche *(Tinca vulgaris)*	–	3,7
Perche soleil *(Eupomotis gibbosus)*	2,0	–
Planaire *(Polyscelis* sp.)		22
Gammare *(Gammarus pulex)*	7,0	0,3
Ephémère *(Ecdyonurus* sp.)	5	0,08
Perlide *(Perla cephalotes)*	14	–

[Concentrations corr. à un TL_m de 1 000 mn].

Le tableau L et la fig. 6.22 montrent les grandes différences de sensibilités qui existent entre les diverses espèces pour un même polluant. Ainsi, dans le cas du chlore, la CL 100 est de 0,2 ppm pour les jeunes salmonides et de 5 ppm seulement pour les *Gambusia,* espèce qui paraît des plus tolérantes à la pollution chimique des eaux.

Les pesticides figurent parmi les contaminants des milieux limniques et marins dont la toxicité est souvent des plus élevées pour les vertébrés à sang froid et les invertébrés qui les peuplent.

La CL 50 (1) de composés comme l'endrine, l'endosulfan et la dieldrine, pour les téléostéens d'eau douce, est inférieure à 5 ppb ! Les insecticides sont en général plus toxiques que les herbicides et les fongicides pour les poissons et les invertébrés aquatiques (Cope,

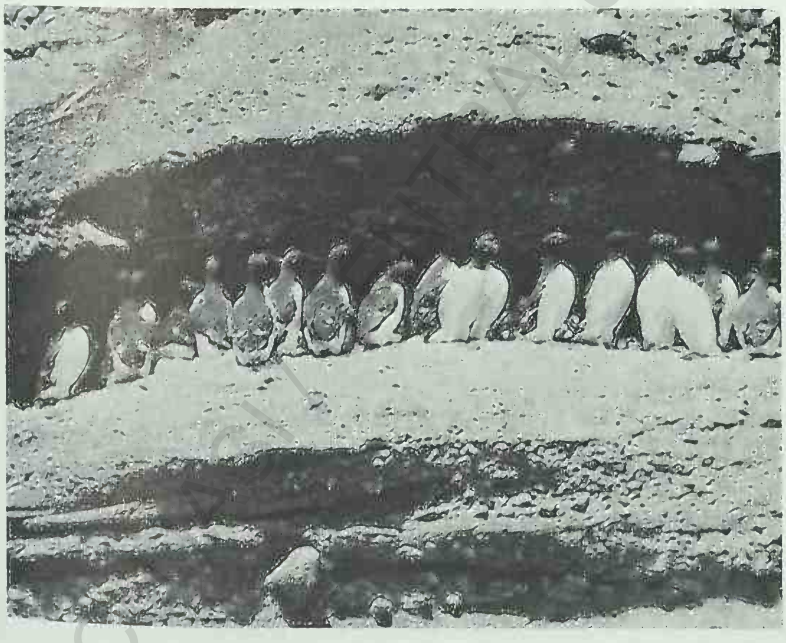
Planche XIX
Le transport pétrolier constitue une cause importante de pollution des océans.
1) Supertanker de 200 000 tonnes allège dans le golfe de Fos (cliché J.C. Ramade)
2) Colonie de guillemots (Uria aalge) *aux Sept Iles. Cette espèce, comme tous les Alcidés, est particulièrement vulnérable à la pollution par le pétrole. Ses effectifs se réduisirent considérablement en France après le naufrage du "Torrey Canyon". (Cliché M. Brosselin)*
3) Cormorans huppés au cap Sizun (Cliché I. Földi)

(1) Evaluée après 48 h d'intoxication.

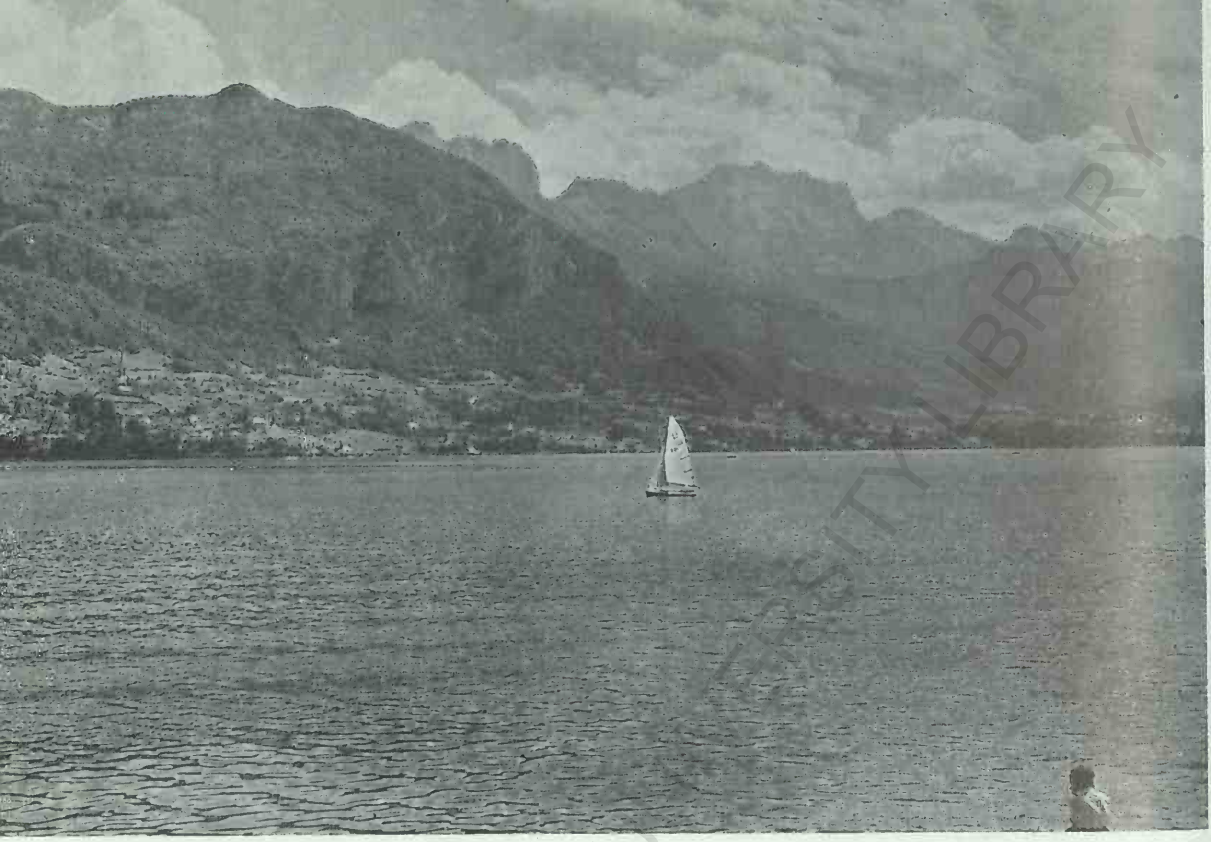
NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

1

2



3



1

2

IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

1971). Dans le tableau LI figurent à titre d'exemple, les concentrations de divers pesticides utilisés pour traiter les rizières ou pour détruire les moustiques et les CL 50 de ces mêmes substances relevées en moyenne pour les téléostéens d'eau douce (d'après Holden, 1964).

Tableau LI — Comparaison des concentrations préconisées pour divers traitements pesticides en milieu aquatique avec leur CL 50 moyenne pour les téléostéens d'eau douce (d'après Holden, 1964).

Substance	A — *Concentration utilisée* (en ppm)	B — *CL 50* pour les poissons* (en ppm)	A/B
Dieldrine (I)	0,27	0,013	20
DDT (I)	0,34	0,02	17
Phosphamidon (I)	0,74	500	1/700
2,4 D (H)	0,5	0,5	1
2,4,5 T (H)	3,7	6	1/2
Aminotriazole (H)	2,2	325	1/150
Acétate de phényl Hg (F)	0,04	0,005	8

I = Insecticides, H = Herbicides, F = Fongicides
* Après 24 heures.

Planche XX
Pollution des eaux continentales.
1) Le lac d'Annecy (cliché ci-contre) était en voie d'eutrophisation à une date encore récente. Il a été sauvé par une série de mesures exemplaires prises à la fin des années 60. Celles-ci ont comporté en particulier, la mise en place d'un émissaire collectant toutes les eaux usées des agglomérations riveraines. Depuis, la transparence des eaux a gagné en profondeur tandis que réapparaissaient la flore et la faune des lacs propres.
2) Raffinerie de pétrole près de Fos-sur-Mer La pétrochimie constitue non seulement une source de pollution atmosphérique mais elle contamine aussi gravement les eaux dans lesquelles elle déverse ses effluents.

L'examen du tableau précédent montre que les doses requises pour les traitements sont nettement supérieures à celles qui font périr la moitié des effectifs des populations de poissons d'eau douce.

Les herbicides du groupe de l'acide phénoxy-acétique paraissent aussi assez nocifs pour les vertébrés aquatiques. On peut à cet égard s'interroger sur les effets des 20 000 tonnes de 2,4,5 T déversés par l'armée américaine sur le delta du Mékong au cours du conflit vietnamien (Gruchow, 1970). Comme l'écrivent Mac Intyre et Holmes (1971) : "La plupart de ce tonnage sera entraîné en mer par les crues de la mousson. Il n'existe aucune étude sur les effets de ce poison dans les chaînes trophiques marines et il semble excessif de penser qu'un écocide à cette échelle ne provoquera aucune conséquence néfaste".

Précisons enfin que même des herbicides en apparence inoffensifs comme l'aminotriazole peuvent provoquer de redoutables effets indirects chez les poissons car ils agissent assez électivement sur les gonades et stérilisent ainsi ces animaux (Halsband, 1969).

CONSEQUENCES BIOCOENOTIQUES DE LA POLLUTION CHIMIQUE DES EAUX

Hydrocarbures

Si l'on excepte les conséquences du "mazoutage" pour l'avifaune marine, les effets écologiques de la pollution par les hydrocarbures demeurent aujourd'hui encore assez mal connus.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

A cet égard, le naufrage du Torrey-Canyon a apporté de précieux renseignements sur les conséquences biocœnotiques de la contamination des eaux marines par les produits pétroliers (cf. Smith J.E., 1970).

Les relevés effectués par les océanographes britanniques de la Station biologique de Plymouth montrèrent que l'ensemble du plancton a beaucoup souffert du contact avec les hydrocarbures. Les *Halosphaera* et *Pterosperma,* organismes phytoplanctoniques du groupe des Prasinophycées qui vivent dans les couches les plus superficielles de l'océan furent particulièrement affectées par le pétrole. Il en fut de même du zooplancton qui se trouvait dans la zone contaminée. On estime que 90 % des œufs pélagiques de pilchard furent détruits et les alevins se raréfièrent beaucoup dans la zone envahie par les flaques d'hydrocarbures qui s'échappèrent des soutes du navire (fig. 6.28).

Le naufrage du Torrey-Canyon a par ailleurs montré la grande nocivité des détersifs en milieu marin. Ces derniers furent utilisés à vaste échelle sur la côte de Cornouailles pour favoriser la dispersion et l'émulsification du pétrole dans l'eau de mer et pour nettoyer plages et rochers souillés par la "marée noire". Quelque 10 000 tonnes de détersifs furent ainsi répandues et firent des ravages dans la faune d'invertébrés néritiques et benthiques. Aucun gastéropode (Patelles, bigorneau), aucune moule, et en général aucun mollusque de la zone de balancement des marées n'échappa au traitement.

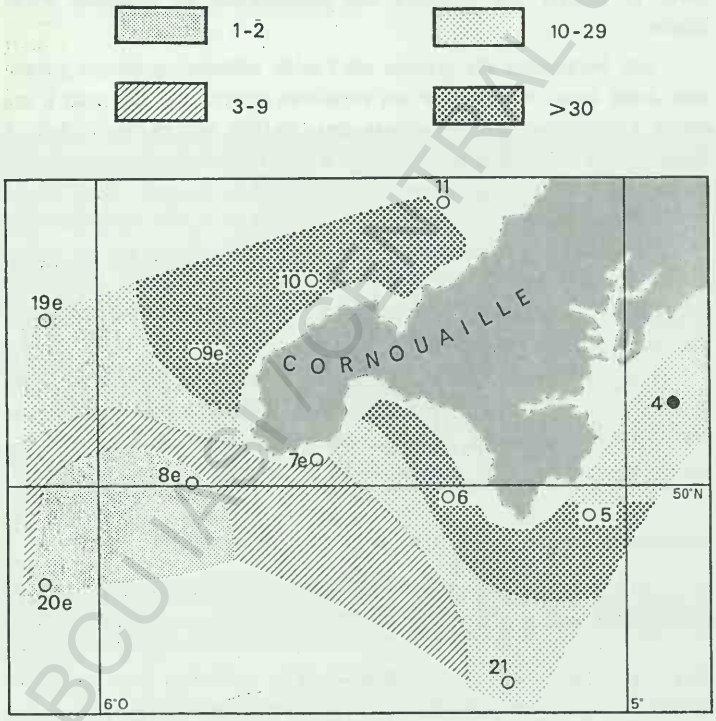


Figure 6.28

Influence de la pollution par le pétrole sur les populations de jeunes pilchards lors du naufrage du "Torrey-Canyon". Les chiffres en haut de la figure indiquent le nombre de poissons de 3 à 20 mm de longueur contenus dans 40 m^3 d'eau de mer. Remarquer la diminution importante des populations de jeunes pilchards dans la zone du Sud-Ouest de la Cornouailles, la plus affectée par la marée noire. D'après Smith "Torrey-Canyon pollution and marine life", Cambridge U P 1970, p. 31

BOUIATIOUI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

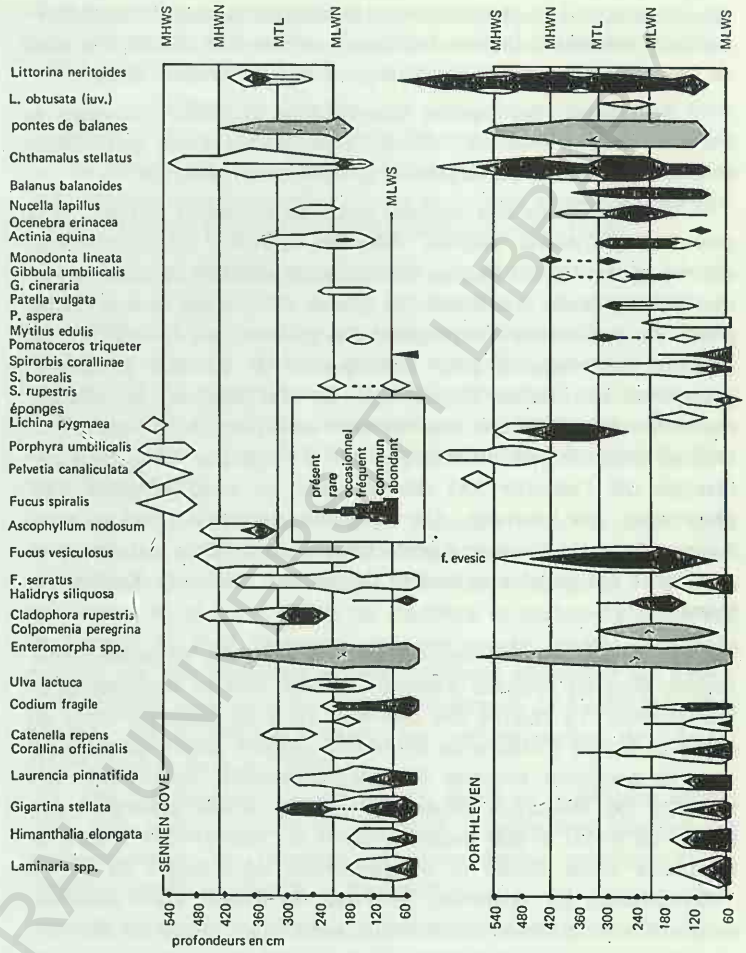


Figure 6.29
Distribution des principales espèces végétales et animales composant les biocoenoses néritiques sur les rives de Cornouailles six mois après le sinistre du "Torrey Canyon". En blanc est figurée la distribution en fonction de la profondeur juste au moment du naufrage, en noir les survivants, en grisé les espèces qui se sont installées à la suite de la catastrophe. D'après Nelson-Smith in "Adv. in Marine biology" Acad. Press, vol. 8, 1970, p. 285

D'autres investigations montrèrent que 100 ppm de détersifs mélangés à l'eau de mer empêchaient la confection du tube chez les jeunes larves d'Annélides polychètes sabulicoles du genre *Sabellaria.* De plus, des incertitudes subsistent sur les effets cumulatifs à long terme pour la faune intersticielle que produiront ces substances surfactantes adsorbées par les sables.

En définitive, mollusques, crustacés libres ou sédentaires (crabes, crevettes, balanes, etc . . .), poissons littoraux, disparurent en quasi-totalité des zones néritiques traitées aux détersifs (fig. 6.29).

La faune benthique souffrit aussi beaucoup de la pollution par ces substances. Des plongées effectuées à des profondeurs comprises entre 2 et 15 m révélèrent une forte mortalité chez les crustacés *Galathea strigosa, Portunus puber* (Crabe nageur) et *Cancer pagurus* (tourteau). Les lamellibranches *Ensis siliqua et*

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Mactra corallina, les échinodermes *Marthasterias glacialis et Echinocardium cordatum* (oursin fouisseur), périrent en masse à la suite de cet usage intempestif des détergents contre la marée noire.

A l'opposé, des espèces comme *Maia squinado* (Araignée de mer) et l'astérie *Asterias rubens,* firent preuve d'une surprenante tolérance aux effets conjugués du pétrole et des détersifs.

Les oiseaux de mer figurent parmi les premières victimes de la pollution pétrolière. Alcidés, Anatidés, Laridés, Procellariformes, etc. se posent sur les flaques de pétrole et souillent de la sorte leur plumage de façon irréversible. La grande affinité des hydrocarbures pour les graisses qui imprégnent les plumes des oiseaux et les rendent hydrofuges a pour conséquence de détruire le matelas protecteur que forme le plumage. En son absence, les oiseaux mazoutés ne tardent pas à se refroidir et à périr de congestion. A cela se surajoute une intoxication due à l'ingestion de pétrole par l'animal qui l'absorbe lors des plongées ou lorsqu'il essaie d'en débarrasser son plumage. Cet empoisonnement se traduit entre autres effets, par de sévères perturbations du système endocrine, en particulier des glandes surrénales des oiseaux mazoutés (Gorman et Milne, 1971).

L'accident du "Torrey-Canyon" a fait de véritables hécatombes dans les colonies d'oiseaux de mer tant en Bretagne qu'en Cornouailles. La réserve des Sept-Iles, dans les Côtes-du-Nord, où soixante années d'efforts de protection avaient permis de reconstituer de prospères colonies fut particulièrement contaminée. Les effectifs de Macareux (*Fratercula arctica*) qu'elle hébergeait passèrent de 4 000 à 600 individus après la "marée noire", ceux de pingouins (*Alca torda*) et de guillemots (*Uria aalge*) de 700 à 100 individus. En revanche, les Fous de Bassan (*Sula bassana*), espèce d'une vigueur exceptionnelle, survécurent mieux au désastre.

En réalité, la Manche, la mer du Nord, la Méditerranée, de plus en plus lourdement polluées par le pétrole, deviennent sans cesse plus inhospitalières pour les oiseaux marins. Ainsi, le long des côtes hollandaises, on a estimé que 20 à 50 000 individus appartenant à une cinquantaine d'espèces aviennes dont 14 espèces de canards, sont chaque année victimes de cette dramatique pollution. En Grande Bretagne, ce chiffre s'élèverait à 250 000 oiseaux par an ! Le problème est identique aux alentours de Terre-Neuve où une colonie de pingouins de plusieurs centaines de milliers d'individus a été décimée en quelques années (Selon Dorst, 1965).

Certains naufrages de pétroliers ont provoqué des pertes irréparables dans diverses colonies d'oiseaux marins. Celui du "Gerd Maersk" dans l'estuaire de l'Elbe en 1955 fit périr à lui seul de 250 à 500 000 macreuses noires (*Melanitta fusca*) d'après Goethe (1968).

Tanis et Mörzer Bruijins (1968) évaluent à 400 000 individus le nombre d'oiseaux de mer qui meurent chaque année dans l'Atlantique Nord par suite de la contamination par le pétrole.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

La régression de la colonie de Macareux des iles Scilly, en Cornouailles est particulièrement spectaculaire. Alors qu'elle comptait plus de 100 000 oiseaux en 1907, on n'en dénombrait plus que 100 en 1967 (Parslow, 1967).

La pollution de l'océan par les hydrocarbures est seule responsable d'une telle hécatombe. De plus, ce processus s'accélère de lui-même car les petites colonies présentent plus d'échecs de reproduction que les grandes et une plus forte mortalité embryonnaire et juvénile (d'après Clark dans Nelson-Smith, 1968).

Après évaporation des fractions les plus volatiles, le pétrole répandu à la surface de la mer est soumis à un phénomène de biodégradation. Les nombreuses espèces chimiques d'hydrocarbures contenues dans le "Brut" seront attaquées par des bactéries aérobies et des champignons dont la systématique est encore mal connue. Cette microflore va décomposer le pétrole en substances dont la nature et *a fortiori* la toxicité sont très peu étudiées ajourd'hui encore !

Aprés plusieurs semaines ou plusieurs mois de cette lente action bactérienne, les produits de dégradation résiduels s'agglomèrent et constituent des nodules bitumineux, de forme irrégulière, qui mesurent de 0,1 à 10 cm de diamètre et dérivent à la surface de l'océan. Ils sont recouverts par une couche grisâtre constituée surtout par des bactéries aérobies. Celles-ci dégradent les hydrocarbures avec une consommation d'oxygène de 12,5 $mm^3/h/cm^3$ de bitume, soit 4 mm^3 par heure et par cm^2 de surface de substrat (Horn, Teal et Backus, 1970).

Les nodules sont de consistance molle et renferment encore dans leur partie centrale des fractions volatiles très toxiques. Ils sont colonisés par l'isopode pélagique *Idotea metallica* et les Anatifes *Lepas anatifera* et *L. fascicularis.*

La taille maximale atteinte par ces crustacés et leur vitesse de croissance sur ce substrat peu banal permet d'évaluer à 2 ou 3 mois l'âge des plus anciens de ces nodules.

De nos jours, tout l'océan mondial est souillé par ces résidus de la biodégradation marine du pétrole. Les nodules semblent s'accumuler dans la mer des Sargasses où les transporte le jeu complexe des courants de l'Atlantique Nord (Morris, 1971).

Les recherches de divers océanographes ont montré l'importance de cette contamination. L'usage des filets à neuston (1) a permis de calculer l'étendue de la pollution de l'Atlantique et de la Méditerranée par ces nodules. Horn et coll. (1970) en ont récolté dans 75 % des prélèvements effectués avec ces filets entre l'île de Rhodes et les Açores (fig. 6,30). Les traces de pétrole n'étaient absentes que dans 16 % de ces 764 relevés !

Morris (1971) évalue à 1 mg/m^2 la quantité moyenne de nodules contenus dans l'océan Atlantique contre 20 mg/m^2 en Méditerranée. Il en déduit que cet océan reçoit entre 190 000 et 760 000 tonnes de rejets pétroliers chaque année et la Méditerranée de $5,3 \times 10^5$ à $2,1 \times 10^6$ tonnes !

(1) Les filets à neuston servent à collecter le zooplancton des couches les plus superficielles de l'océan.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

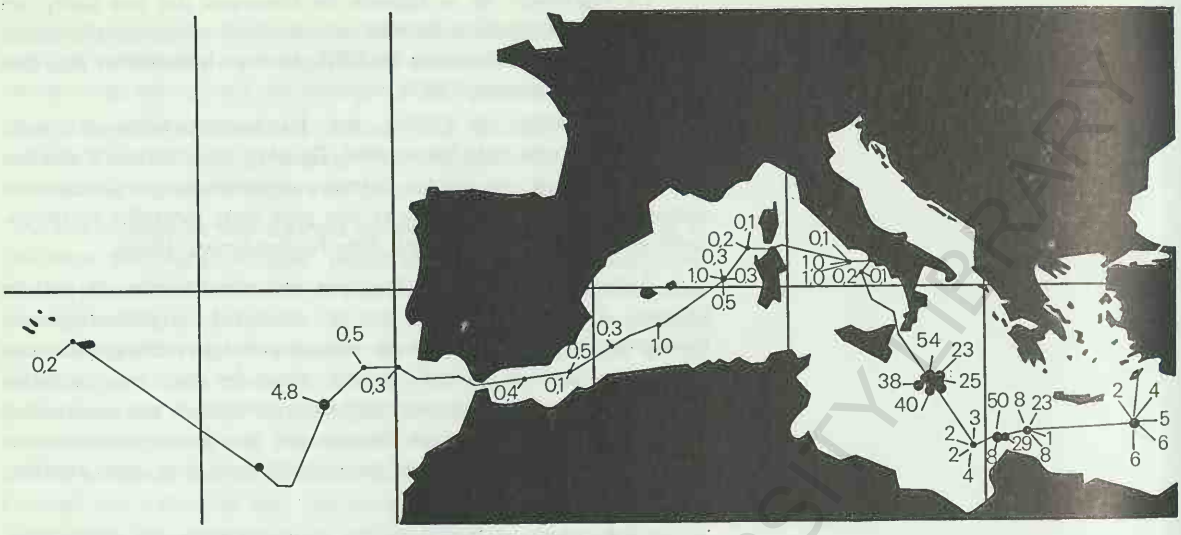


Figure 6.30
Carte montrant la variation de l'importance de la pollution de la surface des mers par le pétrole. Ici sont figurées la fréquence de récolte des boules de bitumes lors d'une croisière d'études océanographiques entre le Liban et les Açores. La largeur des points est proportionnelle au volume de pétrole collecté. Les chiffres représentent ces diverses valeurs en cm^3 multipliées par cent. Presque tous les échantillons prélevés renfermaient des traces de pétrole. D'après Horn, Teal et Backus in *Science, 3928, 1970, vol. 168, p. 245*

Des poissons pélagiques très voraces comme le *Scomberesox saurus* avalent les petits nodules bitumineux. Cette espèce constitue un maillon essentiel des chaînes trophiques dans les mers tempérées. Elle incorpore ainsi des quantités importantes de substances toxiques qui passent de la sorte dans des chaînes alimentaires aboutissant à l'homme !

A cet égard, aucun océanographe digne de ce nom ne saurait cautionner l'usage des détersifs, quels qu'ils soient, en milieu océanique pour lutter contre la pollution par les hydrocarbures.

En effet, le fait d'émulsionner le pétrole dans l'eau de mer favorise son absorption par des animaux microphages et son passage dans les chaînes trophiques au détriment de sa dégradation bactérienne. Même des détersifs comme le Corexit-7664, abusivement présentés comme inoffensifs en milieu marin, ne constituent pas une solution rationnelle dans la lutte contre la contamination des océans par les hydrocarbures. Outre les inconvénients dont nous venons de traiter, ils possèdent un effet synergiste qui exalte la toxicité du pétrole pour les organismes marins (Mac Intyre et Holmes, 1971).

Rappelons aussi que le dépôt du pétrole au fond des océans sous l'effet des détersifs est un non-sens écologique car cela revient à ralentir sinon bloquer toute biodégradation à cause de la faible teneur en oxygène des eaux abyssales.

Malgré les grandes incertitudes qui règnent encore en ce domaine (Nelson-Smith, 1970 ou Button, 1971), il semble que la contamination de l'océan par le pétrole exerce de plus une influence néfaste sur sa productivité primaire.

BU UNIVERSITY LIBRARY

Pesticides

La pollution par les pesticides se traduit aussi par une influence drastique sur les biocœnoses limniques et littorales.

L'usage des insecticides organochlorés dans la lutte contre les insectes vecteurs s'avère catastrophique pour les invertébrés dulçaquicoles ou de la faune littorale et pour les poissons.

Dans le tableau LII figurent à titre d'exemple les effets des campagnes de démoustications sur certains constituants importants des zoocœnoses qui peuplent des marécages côtiers de Floride. Il permet de comparer les CL 50 de ces insecticides pour divers invertébrés et un poisson avec les doses minimales recommandées pour détruire les larves de moustiques. On voit que tous les composés étudiés à l'exception du lindane — encore que ce dernier soit très nocif pour les crevettes — sont utilisés à des doses excédant de 3 à 300 fois selon l'insecticide, la CL 50 correspondante pour ces divers organismes aquatiques.

Mais les effets les plus redoutables de la contamination des eaux par les pesticides résultent de la possibilité de concentration de certains d'entre eux dans les chaînes trophiques, toujours longues en milieu limnique ou marin. Un des exemples les plus célèbre des catastrophes écologiques auxquelles peut conduire la contamination des eaux par les insecticides organochlorés, est celui du Clear Lake en Californie, (Hunt et Bishoff, 1960). Ce lac fut traité au TDE (composé voisin du DDT) en 1949, 1954, 1957 pour éliminer un diptère culicide, *Chaoborus astictopus*. Il importe de préciser que cet insecte n'est pas dangereux car il ne pique pas et ne transmet aucune affection à l'homme. Son seul inconvénient

Tableau LII — Perturbations biocœnotiques de lagunes saumâtres de Floride provoquées par l'usage d'insecticides organochlorés dans la lutte contre les moustiques (D'après Lowe, 1964, *in* Ramade, 1968).

Insecticide	CL 50 *après 96 h de contact* (en ppm)	CL 50 *après 48 h de contact* (en ppm)		*Diminution de productivité du phytoplancton exposé à 1 ppm pendant 48 h*	*Concentration minimale recommandée contre les larves de moustiques* (en ppm)
	Huitre *Crassostraea virginica*	Crevette *Penœus* sp.	Poisson *Mugil curema*		
DDT	7×10^{-3}	10^{-3}	6×10^{-4}	77 %	3×10^{-2}
Aldrine	5×10^{-3}	—	$5{,}5 \times 10^{-3}$	—	—
Chlordane	7×10^{-3}	$4{,}4 \times 10^{-3}$	$5{,}5 \times 10^{-3}$	94 %	2×10^{-2}
Heptachlore	$2{,}7 \times 10^{-2}$	$2{,}5 \times 10^{-4}$	3×10^{-3}	95 %	6×10^{-2}
Dieldrine	3×10^{-2}	5×10^{-3}	$7{,}1 \times 10^{-3}$	85 %	3×10^{-2}
Lindane	0,45	4×10^{-4}	3×10^{-2}	29 %	6×10^{-2}

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

réside en ce qu'il vole en grande abondance et incommode de ce fait promeneurs et baigneurs, lesquels sont parfois entourés par des nuées de ces insectes. Ces campagnes d'éradication se traduisirent par la pollution des eaux du lac, à des doses apparemment faibles : 0,014 ppm de TDE ; mais après l'épandage, le plancton en renfermait 5 ppm et des poissons-chats *(Ameirus catus)* capturés en 1958 en recélaient 1700 à 2375 ppm dans leurs graisses et 22 à 221 ppm dans leurs muscles, de sorte que la colonie de Grèbes occidentaux *(Aechmophorus occidentalis),* oiseaux à régime strictement piscivore qui peuplaient ce lac, connut une régression rapide. De 1000 couples nicheurs, il n'en subsistait que 30 après le traitement et ces derniers paraissaient stériles. Les grèbes trouvés morts renfermaient jusqu'à 2500 ppm de TDE dans leurs tissus.

Quels sont les processus qui conduisent à l'accumulation de telles concentrations d'insecticides dans les super-prédateurs à partir de traces aussi infimes ? Si l'alimentation intervient pour une large part, l'absorption directe de l'insecticide à partir d'une eau faiblement polluée n'est pas négligeable chez certains organismes. C'est même le seul mécanisme en cause dans le cas du phytoplancton. Cette absorption directe est aussi très importante chez les vertébrés. Les poissons absorbent les substances toxiques diluées à des concentrations à peine inférieures aux doses léthales et tolèrent indéfiniment dans leur organisme des quantités parfois fort élevées d'insecticides.

La truite arc-en-ciel *(Salmo gairdneri)* ne peut survivre 14 jours à 1 ppb de toxaphène dans l'eau, en revanche, elle peut être élevée sans inconvénient dans un bac contenant 0,4 ppb de cette substance pendant plus de 280 jours et en accumuler 13,5 ppm ! Avec ce même insecticide, le saumon *(Salmo salar),* pour lequel le CL 100 est aussi de 1 ppb, peut survivre 255 jours dans 0,4 ppb et accumuler 5 ppm de toxaphène dans ses graisses. Cette absorption s'effectue de façon préférentielle par l'intermédiaire de la couche de mucus sécrétée par certaines cellules tégumentaires des poissons et par la circulation branchiale.

Les invertébrés dulçaquicoles et marins peuvent aussi accumuler des doses subléthales d'insecticides avec un coefficient de concentration égal ou supérieur à celui des poissons. Nous avons cité plus haut les taux d'accumulation incroyables que peuvent atteindre les mollusques bivalves comme les huitres (cf. chapitre III, p. 178).

Des crevettes du genre *Penaeus,* pour lesquelles la CL 50 de l'endrine est de 0,6 ppb, survit deux mois dans une eau contenant 0,025 ppb de cette substance et en accumule 5 ppb. Un crabe, *Callinectes sapidus,* peut vivre 4 mois en présence de 0,5 ppb de DDT alors que la CL 50 de cette espèce est de 1 ppb avec cet insecticide.

On conçoit bien dans ces conditions les conséquences catastrophiques qui résulteront de l'ingestion de ces invertébrés ou des

BOUVIER STORAGE UNIVERSITY LIBRARY

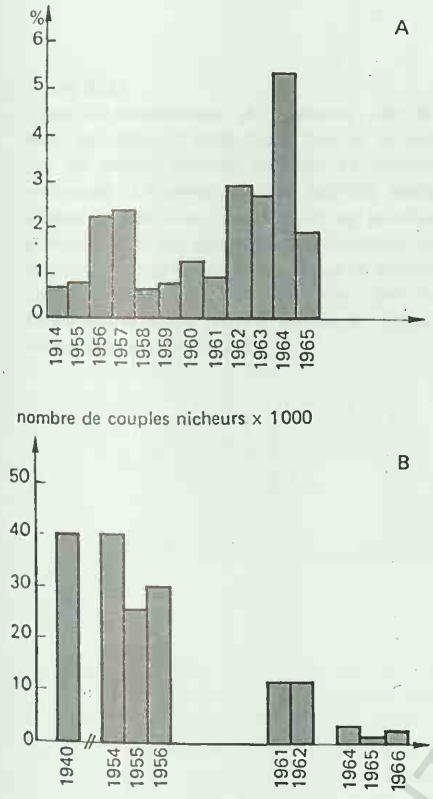


Figure 6.31
Influence de la pollution de la mer du Nord par un insecticide, la Dieldrine, sur les effectifs de Sternes Caugeck du littoral hollandais. A – Diagramme montrant l'accroissement du nombre de jeunes sternes baguées au nid et trouvées mortes au cours de l'année suivante. Celui-ci s'est élevé de dix fois entre 1954 et 1964. B – Régression de l'importance des populations de sternes caugeck en Hollande. On comptait 40 000 couples nicheurs en 1954 et seulement 150 en 1966 ! D'après Koeman et al. in Ramade, 1968

poissons ainsi contaminés par les organismes situés aux échelons plus élevés des chaînes trophiques.

La régression de nombreuses espèces d'oiseaux de mer est entièrement imputable à de tels processus.

Nous citerons à cet égard les remarquables investigations de Koeman et coll. (1967) sur la raréfaction d'une hirondelle de mer, la sterne Caugek *(Sterna sandwicensis)*, autrefois très abondante sur le littoral hollandais. Elles ont montré que le déclin de cette espèce était imputable à un empoisonnement indirect des individus et à une perturbation de leurs fonctions reproductrices. La cause de leur disparition provient incontestablement de la pollution des eaux de la mer du Nord par des traces de dieldrine : les sternes, oiseaux marins à régime ichtyophage, sont situées en bout de chaîne alimentaire (niveaux trophiques IV et V) et exposées de ce fait à de fortes concentrations de substances toxiques.

La sterne Caugek nichait jusqu'à une date récente en grand nombre sur les côtes hollandaises. On en recensait jusqu'en 1950 plus de 40 000 couples dans cette région. En 1955 s'amorça un net déclin ; en 1961, l'effectif total n'était plus que de 10 000 couples nicheurs et on n'en comptait plus que 300 individus en 1965 (fig. 6.31) pour la plupart sur la réserve de l'île de Griend. Koeman et coll. ont constaté que la proportion d'oiseaux juvéniles trouvés morts à l'extérieur de la colonie au cours de l'année postérieure au baguage s'est singulièrement accrue au cours de la période 1955-65. Alors que ces derniers ne représentaient que 0,56 pour cent en moyenne entre 1914 et 1954, cette proportion s'est élevée à plus de 5 % en 1965. En outre, il faut ajouter que de nombreux oiseaux, surtout des jeunes, observés sur place dans la colonie, présentaient des crises de convulsions avant de périr. Ainsi, en 1965, 10 % des poussins nouveau-nés de sterne moururent au cours du seul mois de juin, alors que les conditions climatiques étaient favorables et la nourriture abondante. D'autres oiseaux juvéniles (environ 5 %) périrent à l'âge de 3 à 6 semaines, au moment où ils commençaient à voler. Enfin, ces auteurs observèrent de nombreux cadavres d'adultes dans la colonie pendant la période de nidification et en virent tomber subitement en plein vol, en proie à des crises de convulsions.

L'autopsie des individus trouvés morts ou moribonds montra que ces oiseaux ne présentaient aucun signe d'affection parasitaire ou bactérienne. En revanche, les crises convulsives étaient tout à fait semblables à celles provoquées expérimentalement chez des vertébrés par l'absorption de divers insecticides organochlorés. Toutes les sternes autopsiées présentaient dans leur foie des quantités importantes de résidus de dieldrine (4 ppm) et de télodrine (1 ppm).

L'équipe de Koeman a démontré que ces deux insecticides possèdent une action synergiste. L'injection expérimentale de 5 ppm de dieldrine et 0,75 ppm de télodrine dans des œufs de

poule embryonnés provoquaient 72 h après l'éclosion une mortalité comparable à celle déterminée par l'injection dans l'œuf de 15 ppm de dieldrine seule.

Koeman et ses collègues concluent que les doses de ces cyclodiènes chlorés trouvées dans le foie des sternes mortes sont du même ordre de grandeur que les doses léthales dans les expériences de laboratoire. Ils affirment catégoriquement que la régression de cette espèce avienne sur le littoral de la mer du Nord résulte de la contamination de ses eaux par ces insecticides.

Ces auteurs ont d'ailleurs étudié la pollution du réseau trophique de cette sterne par les insecticides mis en cause. Ils ont constaté que les poissons dont elle tire l'essentiel de sa nourriture : sprats, jeunes harengs, équilles (*Ammodytes lanceolatus*) étaient tous contaminés à des doses de l'ordre de 1 ppm. Ici encore, l'intoxication chronique est bien la conséquence d'une concentration des toxiques le long des chaînes alimentaires.

Mercure

C'est cependant la pollution de l'océan par le mercure qui a donné l'illustration la plus terrifiante des conséquences d'une contamination intempestive de la biosphère par la technologie moderne.

Pour bien comprendre les mécanismes de pollution par cet élément, il faut connaître les modalités par lesquelles il circule dans le milieu naturel.

Le cycle biogéochimique du mercure est à prédominance sédimentaire bien qu'il s'effectue entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère (fig. 6.32). Les quantités de ce métal présentes à l'état naturel dans la biosphère ont deux origines : les éruptions volcaniques et l'érosion hydrique par lixiviation des roches superficielles qui entraîne dans les cours d'eaux puis les océans une fraction du mercure contenu dans les roches superficielles. Jensen et Jernolov (1967) ont montré le rôle essentiel de certaines bactéries des sédiments benthiques dans le cycle de cet élément. Celles-ci transforment le mercure minéral en monométhyl (ou méthyl) mercure, puis en diméthylmercure $(CH_3)_2Hg$, lequel, très volatil, passe dans l'atmosphère. Au contraire, le méthyl-mercure CH_3Hg^+ reste dans l'hydrosphère où il est incorporé aux chaînes alimentaires selon un processus classique. Il est d'abord absorbé par le phytoplancton puis par les divers consommateurs de l'écosystème. Lorsque les plantes ou les animaux meurent, le méthylmercure est restitué aux sédiments et le cycle recommence.

Le mercure est normalement présent à des traces infinitésimales dans les atmosphères non polluées. Il s'y rencontre en phase gazeuse à des concentrations aussi faibles que 0,002 ppb !

Dans les eaux continentales ou océaniques, la concentration de mercure est de l'ordre de la ppb.

BOWLING GREEN STATE UNIVERSITY LIBRARY

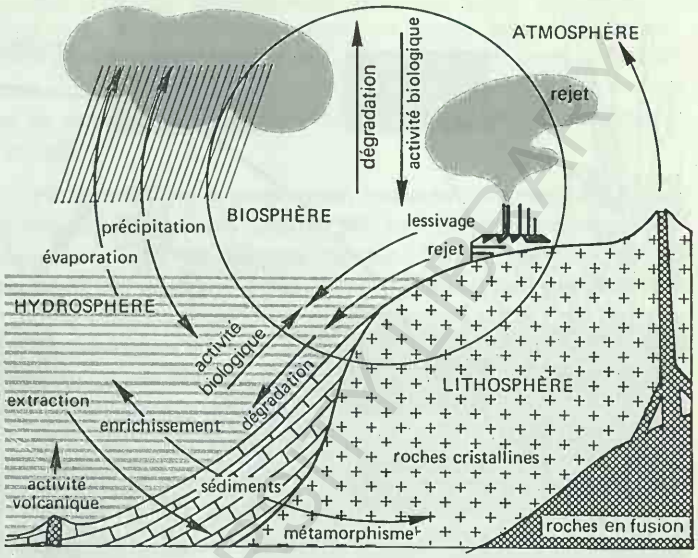


Figure 6.32
Cycle biogéochimique du mercure. Cet élément est dispersé dans l'eau, l'air et les sols par les divers facteurs biogènes et physico-chimiques. L'homme, par ses activités industrielles et agricoles, est en train de modifier profondément les modalités de circulation du Mercure dans la biosphère ainsi que la concentration à laquelle il se rencontre dans les divers écosystèmes. D'après Goldwater, Scient. American, mai 1971, p. 17

Par suite de la faible biodégradabilité de certains de ses dérivés, le mercure tend à se concentrer dans les êtres vivants. Les algues peuvent l'accumuler dans leurs cellules à des taux cent fois supérieurs à sa dilution dans l'eau de mer et des poissons pélagiques comme les thons capturés dans des zones éloignées de tout foyer de pollution peuvent en renfermer jusqu'à 120 ppb. Les thons figurent parmi les animaux marins qui dans les conditions naturelles possèdent les tissus les plus riches en mercure. N'a-t-on pas décelé des taux élevés de cet élément dans le squelette d'individus fossiles de ces poissons vieux de plus de 10 millions d'années ?

Mais l'existence d'organismes qui renferment dans des conditions naturelles de fortes doses de mercure dans leurs tissus n'exclut pas pour autant celle d'une pollution significative des écosystèmes limniques et marins par le mercure que libère dans l'environnement l'industrie moderne.

Les travaux effectués au cours des années 60 par divers chercheurs japonais et suédois ont montré de façon irréfutable que le mercure rejeté dans les eaux sous forme organique ou minérale se transforme inexorablement en méthylmercure très peu biodégradable. Celui-ci s'accumule dans les diverses espèces qui composent les réseaux trophiques ainsi contaminés (fig. 6.33). Westöö (1966) a pu montrer que la plupart du mercure présent dans les poissons des lacs suédois se trouvait dans les tissus sous forme de méthylmercure.

L'histoire de la maladie de Minamata, qui résulte d'une contamination des poissons et divers invertébrés marins par de fortes doses de méthylmercure est fort édifiante à cet égard. Cette

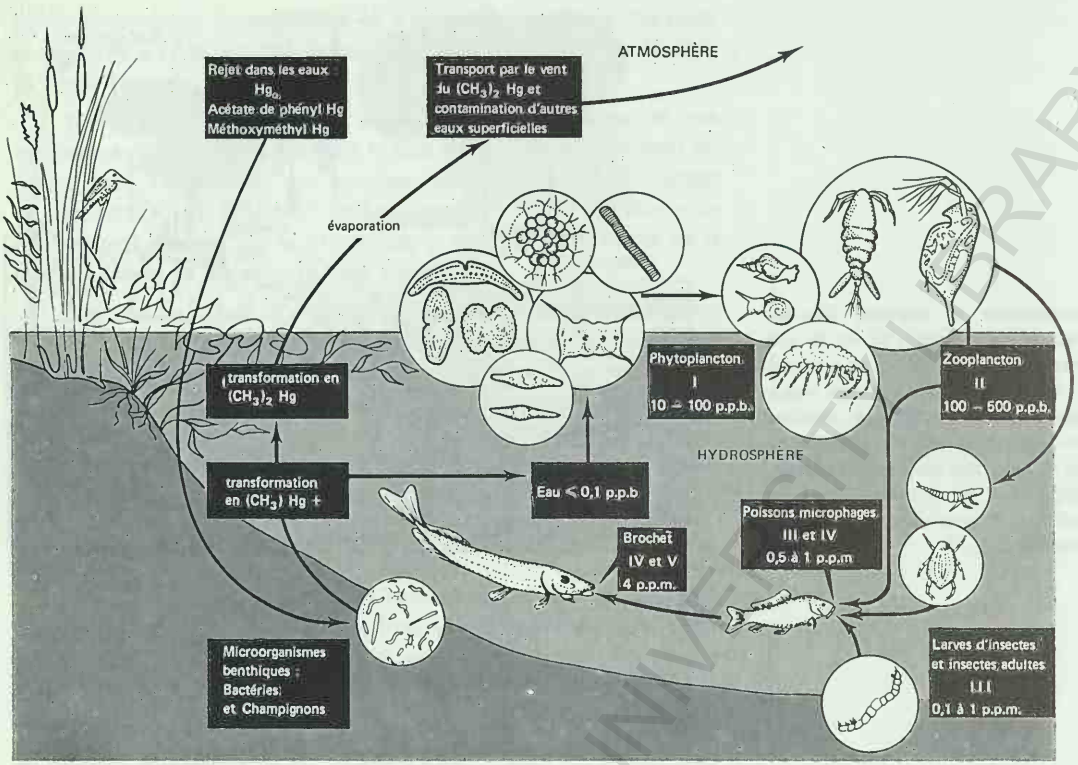


Figure 6.33
Incorporation et concentration du Mercure dans une biocoenose limnique. Le rejet dans les eaux de diverses formes minérales et organiques de cet élément s'accompagne de sa transformation par les micro-organismes décomposeurs benthiques en méthyl Hg très toxique, qui va être absorbé par les autotrophes et se concentrer dans les chaînes alimentaires. On observe aussi la formation de $(CH_3)_2Hg$, volatil, qui assure la dissémination de ce métal. Les chiffres romains figurent le niveau trophique. On lit au-dessous l'ordre de grandeur de la concentration en méthylmercure dans les organismes considérés (Figure réalisée d'après un dessin de Duvigneaud et les données numériques de divers auteurs suédois in *Ramade, Sci. Progrès, sept. 1972, p. 40.)*

affection s'est manifestée par deux fois au Japon : à partir de 1953 dans la baie qui a donné son nom à la maladie, puis en 1965 dans la région de Niigata.

En 1956, une mystérieuse épidémie se répandit dans la baie de Minamata. Elle n'était pas contagieuse, frappait des familles entières, surtout de pêcheurs, dont la nourriture était pour l'essentiel fondée sur la consommation de mollusques, crustacés et poissons capturés dans les eaux de la baie.

Cette maladie se caractérisait par divers troubles du système nerveux central, de nature aussi bien sensorielle que motrice : constriction du champ visuel, difficultés d'audition, d'élocution, défaillance du raisonnement, tremblements, démarche hésitante, etc.

PUBLICATIONS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Sur 116 cas officiellement reconnus furent dénombrés 43 morts ; les survivants présentèrent de façon irréversible le syndrome décrit ci-dessus. Cependant, les médecins japonais qui enquêtèrent sur cette épidémie évaluent à plusieurs centaines le nombre réel de personnes qui ont manifesté des atteintes plus discrètes de la maladie.

Par ailleurs, ces experts furent intrigués d'apprendre que dans les villages de pêcheurs atteints par ce mal, de nombreux chats présentaient aussi des troubles nerveux. Certains, devenus fous, se suicidaient en se jetant à l'eau, comportement très aberrant chez un animal dont l'aversion pour cet élément est notoire. La cause de la maladie provenait selon toute vraisemblance de l'existence dans la nourriture des habitants de la baie et de leurs animaux domestiques d'un facteur pathogène ou toxique.

De minutieuses investigations effectuées entre 1956 et 1959 firent mettre hors de cause une dizaine de métaux et métalloïdes. En revanche, on constata que les symptômes apparaissaient chez des chats normaux alimentés expérimentalement avec des poissons pêchés dans la baie. En 1959, la découverte de mercure dans les poissons toxiques attira l'attention du groupe de chercheurs qui s'efforçait d'élucider les causes de la maladie de Minamata. Comme le souligne Ui (1971) "l'usine de Minamata ne coopéra en aucune façon avec ce groupe, elle lui refusa toute information sur le procédé de fabrication (synthèse de l'acétaldéhyde et du chlorure de vinyle avec du $HgCl_2$ et du $HgSO_4$ comme catalyseurs) et sur la composition des résidus rejetés. Même le prélèvement de ces derniers fut refusé par la direction".

Hosakawa (1959) put montrer que les résidus émis par les installations de synthèse de l'acétaldéhyde provoquaient les mêmes symptômes chez les animaux que l'ingestion de poissons contaminés. Cela suggérait l'éventualité d'une transformation du mercure minéral en un composé organométallique hautement toxique.

Les groupes d'intérêts mis en cause par de telles constatations ne tardèrent pas à réagir. En 1960, un professeur réputé, Tamiya, contesta avec virulence ces observations sur l'origine de la maladie de Minamata, et proposa la création par l'administration de divers ministères d'un Comité constitué par des "personnes qualifiées" pour étudier les causes de cette affection. . .". Il fut ultérieurement montré que l'équipe de Tamiya recevait des fonds de l'industrie chimique pour contredire la théorie du mercure comme cause de la maladie de Minamata" (Ui, 1971).

En 1962, Irukayama isolait du méthylmercure à partir des eaux résiduaires de l'usine qui avait enfin consenti à donner son accord pour effectuer des prélèvements. Hosakawa, simultanément, extrayait ce composé des boues émises par les effluents, et montrait que celles-ci provoquaient l'apparition des symptômes de la maladie chez les animaux à la nourriture desquels on les avait incorporées. D'autres chercheurs montraient vers la même époque

BCU IASI / CENTRE UNIVERSITAIRE

que lors de la réaction de condensation entre l'eau et l'acétylène il se forme un composé organométallique instable qui se décompose *pro parte* en méthylmercure dans une réaction secondaire.

L'apparition en 1965 de la même affection dans la région de Niigata, très éloignée de Minamata, apporta une preuve supplémentaire de la responsabilité du méthylmercure dans cette maladie. Sur 30 personnes gravement atteintes, 5 périrent. Toutes consommaient de grosses quantités de poissons qu'elles pêchaient dans la rivière Agano... Or les eaux de celle-ci recevaient les effluents d'une autre unité de synthèse de l'acétaldéhyde. Cette usine dépendait du puissant trust chimique nippon Showa Denko.

Une nouvelle contre-attaque fut alors lancée par l'industrie chimique japonaise. Celle-ci conduisit le ministère de la Santé publique à supprimer tout crédit de recherche à l'équipe de médecine et d'écologistes qui s'efforçait d'élucider le problème de la maladie de Minamata !

Toutefois, les investigations effectuées dans la région avaient montré de façon irréfutable la responsabilité du méthylmercure. Parmi les divers arguments expérimentaux qui appuient cette affirmation, nous citerons la corrélation étroite qui existe entre la teneur en mercure des cheveux d'individus malades ou normaux, l'importance du poisson dans leur régime alimentaire et l'apparition des symptômes (fig. 6.29).

Par ailleurs, les analyses effectuées dans la région de Niigata ont montré que le taux de mercure total relevé dans les poissons de la rivière Agano prélevés en aval de l'émissaire de l'usine d'acataldéhyde, était toujours nettement supérieur au maximum admis dans l'alimentation humaine par les autorités sanitaires internationales (0,5 ppm). Il s'élevait souvent à plus de 10 ppm. En outre, dans plus de la moitié des poissons examinés, le méthylmercure représentait plus de 25 % du mercure total contaminant leur organisme !

Aujourd'hui, le méthylmercure apparaît comme l'unique cause de la maladie de Minamata ! C'est l'ingestion d'importantes quantités de poissons et autres animaux aquatiques contaminés par celui-ci qui détermine l'apparition des symptômes, parfois après plusieurs années de période latente.

Au Japon, le méthylmercure provenait des résidus de fabrications d'usines de synthèse d'acétaldéhyde bien que la conversion de mercure minéral en ce composé par les bactéries des sédiments benthiques ait certainement contribué à sa formation.

Le méthylmercure libéré dans l'environnement s'est ensuite concentré dans les chaînes trophiques, toujours assez longues en milieux aquatiques. Ainsi, dans la baie de Minamata, ce composé n'excède jamais 0,1 ppb dans l'eau de mer, mais on en relevait jusqu'à 50 ppm (exprimé en mercure) dans certains poissons de la baie, soit un coefficient de concentration de 500 000 entre l'eau polluée et la nourriture des pêcheurs de cette région. De même

DO NOT REMOVE FROM UNIVERSITY LIBRARY

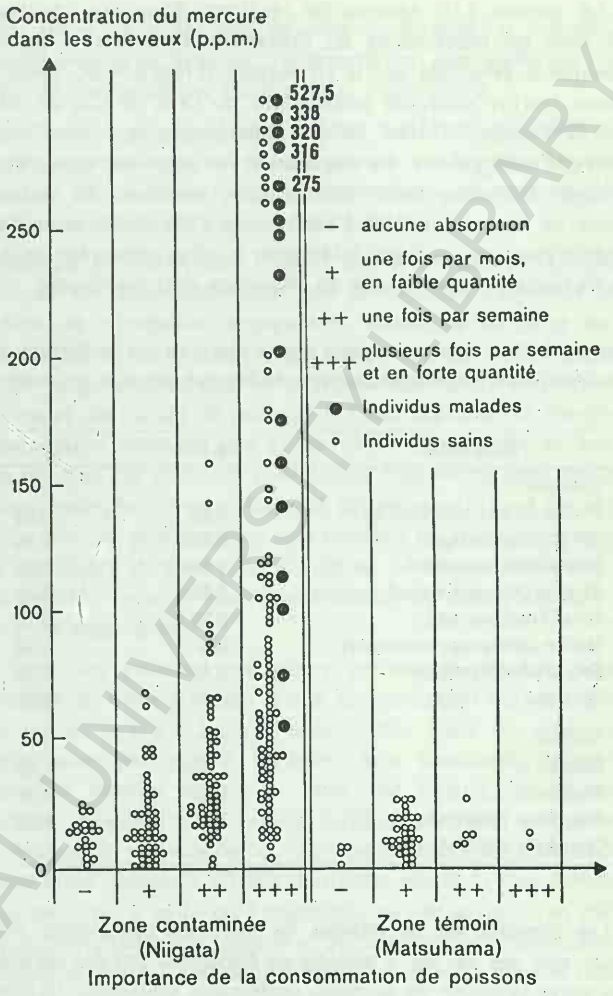


Figure 6.34
Concentration du mercure dans les cheveux de Japonais de la région de Minamata. Le diagramme permet de déceler une corrélation entre l'importance de consommation de poisson en zone contaminée et en zone témoin et la concentration du mercure dans les cheveux d'individus sains ou malades. Il existe une bonne concordance entre les quantités de poisson ingérées et le niveau de contamination des individus. En outre, la concentration en mercure des cheveux est beaucoup plus élevée dans la zone où est apparue la maladie de Minamata que dans la zone témoin indemne de l'affection. On observe toutefois des teneurs élevées dans les cheveux d'individus apparemment sains. En réalité, la corrélation entre la dose et l'apparition des troubles serait meilleure si l'on avait figuré non pas la teneur totale en Mercure, mais celle en méthylmercure, seul responsable de la maladie par suite de son pouvoir d'accumulation dans le cerveau et de sa haute toxicité. D'après Ui, 1971 in *Ramade 1972, p. 44*

alors que l'eau de la rivière Agano ne renfermait que 0,1 µg/l de méthylmercure, on relevait jusqu'à 10 ppm de mercure dans les diatomées et 40 ppm chez les poissons, ce qui correspond à un taux de concentration de 400 000 fois supérieur à celui trouvé dans la biomasse aquatique.

La contamination des écosystèmes limniques et marins par le méthylmercure n'est pas hélas ! un phénomène localisé au Japon. Les rives septentrionales de la Méditerranée, le littoral hollandais et la Suède, ainsi que certains lacs canadiens souffrent aussi d'une telle pollution.

Ui (1971) a pu montrer, en particulier, l'existence d'une contamination par le mercure, d'origine non identifiée, des eaux côtières des Alpes Maritimes.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le tableau LIII résume les résultats d'analyses réalisées en 1969 dans les laboratoires du Professeur Kitamura, à partir de prélèvements effectués par le Dr Aubert (I.N.S.E.R.M., Nice). Les animaux marins examinés provenaient du Cros de Cagnes, situé à 10 km à l'ouest de Nice. Il est remarquable que sur 7 espèces étudiées, 4 atteignaient ou dépassaient le seuil de concentration maximale admissible dans l'alimentation humaine. En outre, les cheveux de certains individus renfermaient des doses assez élevées de méthylmercure, quoique inférieures à celles observées au Japon dans les régions où la maladie de Minamata s'est manifestée.

Tableau LIII – Contamination par le mercure sur le littoral des Alpes-Maritimes (exprimée en ppm de Hg par rapport au poids sec)

Echantillon	*Hg total*	*Méthyl Hg*
Poissons :		
Perche de mer (*Serranus* sp.)	0,99	0,43
Sar (*Diplodus sargus*)	0,40	0,14
Moule (*Mytilus edulis*)	2,58	0,06
Sardine (*Arengus minor*)	0,46	0,22
Vive (*Trachinus* sp.)	0,38	0,13
Merlan (*Merlangus merlangus*)	0,87	0,58
Bogue (*Boops boops*)	0,48	0,39
Severeau	2,09	0,90
Homme :		
Pêcheur n° 1	7,39	7,16
Pêcheur n° 2	1,58	0,75
Chercheur INSERM n° 1	3,66	2,58
Chercheur INSERM n° 2	2,88	1,59

Les données de ce tableau ne sont pas rassurantes. Faut-il rappeler que des cas de la maladie de Minamata ont été signalés au Japon après ingestion de poissons renfermant seulement 10 ppm de mercure (par rapport à leur poids vif et non sec comme c'est le cas pour toutes les données numériques précédentes) ? A la suite de telles observations, divers experts sanitaires, en particulier en Suède, ont d'ailleurs proposé de réviser les doses maximales admissibles (0,5 ppm) qu'ils considéraient comme trop élevées.

Ui (1971) précise toutefois que les concentrations en mercure relevées dans les cheveux de quelques habitants de la région de Nice sont comparables à celles des japonais de zones "témoin" dont le régime est à prédominance ichtyophage et chez lesquels l'usage des fongicides organomercuriels en agriculture est répandu depuis de nombreuses années.

En Suède, les problèmes de pollution par le mercure, bien qu'ils n'aient pas atteint le degré de gravité qu'on leur connaît au Japon, ont revêtu une ampleur considérable au cours des années 60. Ils ont conduit les autorités du pays à prendre des mesures drastiques : interdiction de la pêche et de la commercialisation du

BCU Lausanne / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

poisson pêché dans les lacs de plus de 80 districts incluant des zones côtières de la Baltique, réglementation très sévère de l'usage des dérivés mercuriels par l'industrie et l'agriculture.

L'attention des hygiénistes suédois fut attirée dès 1965 par le fait que les poissons d'eau douce vendus sur les marchés renfermaient de hautes teneurs en méthylmercure, souvent de l'ordre d'une ppm (par rapport à leur poids sec).

Johnels et Westermark (1967) établirent que cette contamination de la faune aquatique par le mercure provenait de la pollution de nombreux écosystèmes limniques du pays par les rejets d'effluents de l'industrie du papier. Celle-ci utilisait en effet comme fongicide l'acétate de phénylmercure dans la préparation des pâtes et des pulpes de cellulose ! Cette pollution se manifestait non seulement dans les lacs et les cours d'eau situés en aval des usines rejetant ces effluents contaminés mais même dans des zones lacustres exemptes d'industries mais situées sous le vent des régions polluées (on sut plus tard que cela résultait du transport atmosphérique de divers dérivés volatils comme le diméthylmercure). Ces auteurs purent montrer une concentration du méthylmercure dans les chaînes trophiques.

Chez des poissons prédateurs comme le brochet, situés à l'extrémité de celles-ci, alors que la concentration normale dans les tissus est de 0,1 à 0,2 ppm, celle-ci était égale ou supérieure à 0,5 ppm avec des pics à 10 ppm, dans cinquante échantillons prélevés en diverses régions du pays. Par ailleurs, ces chercheurs mirent en évidence une bonne corrélation entre la teneur en méthyl mercure des muscles et l'âge des brochets. Le coefficient de concentration dépassait 40 000 chez cette espèce si l'on compare la teneur de l'eau à celle de l'organisme de ces poissons en méthylmercure. Simultanément, Jensen et Jernolov (1964) montraient que des bactéries étaient capables de convertir dans les eaux le mercure minéral ou organique en méthylmercure puis en diméthylmercure. Comme ce dernier composé est volatil, elles se débarrassent de la sorte de l'excès de mercure présent dans leurs cellules.

A partir de 1965, le gouvernement suédois, en accord avec les industries concernées qui montrèrent un esprit coopératif digne d'éloges, prit un ensemble de mesures exemplaires pour juguler la pollution par le mercure. La plus stricte interdiction de l'usage de l'acétate de phénylmercure dans l'industrie du papier fut édictée, puis, en 1966, celle des alkylmercuriels fongicides en agriculture. Les firmes électrochimiques qui fabriquaient du chlore mirent au point vers la même époque un procédé permettant de réduire de 150-200 g/j à 100 g/an la quantité de mercure rejetée pour chaque tonne de chlore produite.

Un fait révélateur de la différence d'état d'esprit qui sépare les industriels suédois de ceux du "continent" à l'égard des problèmes d'environnement est cité par Barde et Garnier (1971) dans leur ouvrage "La Suède en question". En 1966, la firme CASCO AB

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

"jugeant immoral de poursuivre l'exportation de produits interdits d'emploi en Suède et désireuse de faire cesser les pollutions engendrées par leur fabrication, a décidé d'arrêter la production d'un fongicide au méthylmercure". Il y a là un bel exemple à méditer pour l'industrie chimique d'autres pays européens, en relation avec son attitude à l'égard de certains insecticides organochlorés. . .

Les eaux continentales Nord-Américaines ne sont pas indemnes de pollution par le mercure. Le lac St-Clair, au Canada, présente aujourd'hui une forte contamination de toute sa biocœnose par cet élément (Dustman, Stickel et Elder, 1970). Les poissons contenus dans le jabot d'oiseaux ichtyophages renferment des doses élevées de mercure, comprises entre 2 et 4 ppm. Sa concentration dans 147 échantillons d'oiseaux d'eau étudiés appartenant à 15 espèces différentes excède 0,2 ppm. Un grand héron bleu *(Ardea herodias)* renfermait 23 ppm de mercure dans ses muscles et 175 ppm dans son foie ; par ailleurs, les doses de cet élément relevées dans les œufs analysés étaient comparables à celles qui ont expérimentalement réduit la fécondité d'œuf de faisans.

La pollution de l'hydrosphère par le mercure est exemplaire à bien des égards. Elle nous enseigne que les mécanismes naturels de biodégradation, s'ils constituent en général de précieux auxiliaires dans la lutte contre les polluants, peuvent revêtir parfois des effets défavorables. Tel est le cas de la transformation du mercure et de ses dérivés organiques en redoutable méthylmercure par certaines bactéries limniques ou marines.

Par ailleurs, elle montre l'aspect multiforme des risques qui découlent de toute pollution. Faut-il rappeler que l'on a découvert de très graves anomalies congénitales chez des enfants nés de femmes apparemment indemnes dans les régions de Minamata et Niigata ? Le Suédois Skerfving (1971) a d'ailleurs mis en évidence des altérations chromosomiques dans les lymphocytes de personnes qui se nourrissent de poissons contaminés par du méthylmercure (fig. 6.35).

Figure 6.35
Effets mutagènes du méthylmercure. Ici sont figurés des "squash" chromosomiques de lymphocytes chez des personnes présentant de hautes concentrations en mercure dans leur sérum par suite de l'absorbtion de poissons très contaminés par le méthyl-Hg. Le cliché de gauche montre des cassures chromosomiques avec apparition d'extra-fragment. Celui de droite des chromatides dépourvues de centromère. D'après Skerving in *Goldwater, Sci. Amer., mai 1971, p. 24.*

L'ensemble des conséquences écologiques qui résultent de la pollution de la biosphère par le mercure constitue à bien des égards un signal d'alarme. Il est grand temps de mettre un terme au comportement irresponsable de la civilisation industrielle à l'égard des milieux limniques et marins.

BOWLING GREEN STATE UNIVERSITY LIBRARY

Le rejet de chaleur dans l'environnement constitue de nos jours une forme de pollution physique du milieu naturel susceptible de provoquer de véritable bouleversements biocoenotiques car elle agit sur un facteur écologique primordial : la température du milieu.

L'utilisation des eaux continentales et littorales pour le refroidissement des centrales électriques conventionnelles ou nucléaires se traduit par un rejet de chaleur dans le milieu susceptible de provoquer, s'il est assez important, de très graves perturbations biocoenotiques. Cette pollution thermique des eaux, improprement appelée "caléfaction" par certains spécialistes, est un phénomène de nature physique, relativement récent, en grande partie lié à l'heure actuelle au développement de programmes électronucléaires dans les divers pays industrialisés.

Elle présente des problèmes très spécifiques, ce qui justifie sa place à la fin de ce chapitre.

I. Causes et importance de la pollution thermique

La pollution thermique provient de l'usage fait par l'homme de sources d'énergie artificielles qui modifient de façon plus ou moins importante le bilan énergétique des écosystèmes. Les combustibles fossiles et maintenant la fission de l'Uranium, auxquels notre civilisation a recours comme sources d'énergie primaire perturbent le bilan énergétique global de l'écosphère, car elles se surajoutent au flux solaire, lequel constitue l'unique entrant énergétique naturel. Si les modifications produites à l'échelle de la biosphère ne sont pas encore inquiétante, l'apport de la technologie ne représentant que le 1/10 000 ème du flux solaire total à l'heure actuelle, il n'est plus de même si l'on se place au niveau de la région voire des macroécosystèmes.

De nos jours, dans le comté de Los Angeles, l'apport de chaleur artificielle résultant de l'usage des combustibles fossiles dépasse 5 % du flux solaire total sur une surface évaluée à 10^6 hectares ! l'ilôt de chaleur urbain constitue d'ailleurs un phénomène bien connu du profane. Il est notoire que la température moyenne dans les villes est supérieure à celle de la campagne environnante ; l'écart maximum s'observe pendant la période hivernale, à cause du chauffage des habitations.

Si les conséquences de la pollution thermique peuvent donc être perceptibles à l'échelle des mésoclimats, il n'empêche que ses effets sont avant tout préoccupants en milieu aquatique à l'heure actuelle.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dès à présent, *la pollution thermique des eaux* continentales et littorales peut atteindre localement une telle ampleur qu'elle menace la perennité de l'ensemble des biocoenoses propres à ces milieux.

La cause essentielle de la pollution thermique des eaux provient de la production d'électricité quoique les aciéries et d'autres industries lourdes puissent en certaines régions y contribuer de façon significative.

Qu'elle soit d'origine thermique classique ou nucléaire, l'électricité est produite par des générateurs actionnés par des turbines à vapeurs dont le bilan thermodynamique est régit par le second principe de Carnot (cf. chap. I formule 4, p. 50).

En corrolaire du second principe, il découle que le rendement de toute machine thermique ne peut être égal à 100 %, seule une partie de l'énergie primaire utilisée est réellement disponible à la fin du cycle. Le rendement de toute machine thermique dépend uniquement des températures absolues de la source chaude (T_2 = température de la vapeur à la sortie de l'échangeur) et de la source froide (T_1 = température de la vapeur au niveau du condenseur).

Nous avons donc la relation :

$$r\,\% = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \qquad (2)$$

T_1 et T_2 sont exprimés en degrés Kelvin.

T_1, température minimale du fluide calorique (ici d'eau) sera de 100°C à la pression ordinaire (température de condensation). soit 372 K. En réalité, on peut accroître le rendement dans les centrales modernes par usage de condenseurs en dépression ce qui abaisse le point de condensation. Les réacteurs électronucléaires actuellement en construction vont dissiper des quantités considérables de basses calories dans l'environnement. En effet, le refroidissement des condenseurs se fait avec de l'eau prélevée soit dans les fleuves, soit dans la mer. Dans un cas comme dans l'autre se produit un échauffement inéluctable. N'oublions pas qu'à l'heure actuelle sont en cours d'achèvement dans notre pays plusieurs réacteurs de 920 MW électriques (Bugey II et III p.e) et que l'on prévoit de passer prochainement à des tranches de 1 300 MW (el). Comme la filière adoptée dans notre pays, après abandon des réacteurs graphite gaz mis au point pour le CEA. est celle de l'eau légère pressurisée (PWR) (1) sous licence Westinghouse, la source chaude ne peut dépasser 320° C dans les conditions de pression qui leurs sont propres. On peut facilement calculer, à l'aide de l'équation (2) que le rendement thermodynamique des réacteurs PWR sera de l'ordre de 35 % . Cela signifie que pour 35 KWh d'électricité produites, le réacteur rejetera 65 KWh de chaleur dans l'environnement, au niveau des condenseurs, sous une forme inutilisable.

(1) PWR = Pressurised Water Reactor – cf. Chap. Pollution nucléaire, p.

UNIVERSITY LIBRARY

Le rendement thermodynamique des centrales nucléaires de type PWR est donc sensiblement inférieur à celui des centrales thermiques classiques. A puissance électrique égale, il en résulte une pollution thermique supérieure de 50 % à celle engendrée par une centrale fonctionnant au charbon p.e. Les rejets d'eau chaude par les réacteurs électronucléaire vont donc poser de très sérieux problèmes écologiques, compte tenu de l'ampleur des programmes en cours aussi bien en France qu'à l'étranger. Dans notre pays 50 GW (el) produits à partir de réacteurs de type PWR sont prévus pour 1985 à comparer avec les 27 GW (el) représentant la puissance installée totale de l'E.D.F. en 1973 !

L'échauffement des cours d'eaux deviendrait inadmissible si ces derniers servaient à refroidir les condenseurs de ces centrales par des systèmes en circuit ouvert.

Le cas de la centrale de Montereau illustre bien les besoins considérables en eau de refroidissement de tels dispositifs. Il s'agit d'une usine thermique classique, fonctionnant au charbon, de 750 MW (el). Elle prélève 28 m^3/sec. dans la Seine dont le débit d'étiage au niveau de cette localité est à peine de 30 m^3/sec. Cela signifie qu'au moment des basses eaux, la quasi totalité du fleuve passe au niveau des condenseurs !

Bien que le Rhône présente un débit nettement supérieur à celui de la Seine, avec étiage hivernal (et non estival), il subira sans aucun doute un réchauffement important de ses eaux à la suite de la mise en service des réacteurs PWR de Bugey II et III, dont la puissance électrique unitaire sera de 920 Mw.

Ce seront en effet quelques 3 500 Mw thermiques qui seront rejetés par ces réacteurs dans le fleuve puisque l'on a choisi la solution du refroidissement en circuit ouverte malgré les sérieuses critiques d'une telle option présentée par les défenseurs de l'environnement.

De toute façon, l'ampleur des besoins en eau de refroidissement des centrales électriques est telle que l'usage des eaux continentales devra être rapidement abandonné.

Quelques données numériques permettent de préciser les quantités considérables d'eau nécessitées par la production électrique et quelques industries, ainsi que la pollution thermique concomitante.

Aux Etats-Unis, un volume de 300×10^9 m^3 d'eau fluviale était employé à la fin des années 60 pour le refroidissement des condenseurs. A la même époque, en Grande-Bretagne, 18×10^9 m^3/eau servaient au même usage, dont 60 % étaient prélevés dans les eaux continentales.

En France, la pollution thermique est devenue un sujet de graves préoccupations pour les agences de Bassin à la suite de l'adoption du programme électronucléaire actuel le calcul montre en effet

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

que si la croissance de la production électrique de notre pays s'effectue conformément aux prévisions, le rejet d'eau chaude dans les fleuves élèverait à la fin du siècle de plus de 10°C la température de tous nos cours d'eau, dans l'hypothèse ou le refroidissement des centrales s'effectuerait en circuit ouvert. Les conséquences biocœnotiques de ce réchauffement seraient catastrophique.

Le tableau XLIV A figure l'ampleur des besoins en eau de refroidissement au programme électronucléaire américain.

Tableau XLIV A — Consommation d'eau douce nécessitée par la production électronucléaire aux Etats-Unis d'ici la fin du siècle (*)

(*) (d'après Belter, 1975)

Années	*Puissance installée* (en MW el)	*Volume d'eau nécessaire au refroidissement* (m^3/sec)	*Eau perdue par évaporation* (en m^3/sec)
1980	102 000	1 685	53
1985	250 000	3 741	184
1990	475 000	8 227	416
2000	1 090 000	20 437	1 050

De telles prévisions sont fort préoccupantes pour les services responsables de l'approvisionnement en eau de ce pays quand on sait que la totalité des eaux superficielles américaines correspondent à un débit de 52 000 m^3/sec. Cela signifie que dans la dernière décennie du siècle plus de 40 % des eaux courantes serviront aux Etats-Unis à refroidir des centrales nucléaires malgré l'adoption pour les deux-tiers d'entre elles de systèmes de refroidissement en circuit fermé.

Dans notre pays, ces mêmes considérations relatives à la consommation d'eau ont conduit à placer un grand nombre de sites nucléaires sur le littoral, pourtant déjà bien encombré par l'urbanisation et l'industrialisation anarchiques (qu'adviendra-t-il du fameux "tiers sauvage" ?). Par ailleurs, les sites d'implantation qui demeurent à l'intérieur des terres seront à l'avenir systématiquement dotés de tours de pulvérisation.

II. Consequences de la pollution thermique des eaux

A. *Effets sur les facteurs abiotiques.*

1) Action sur la température.

La conséquence immédiate et évidente du rejet d'eau chaude en milieu limnique ou marin tient en une élévation significative de la température des eaux naturelles qui reçoivent ces basses-calories.

ESU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dans des pays très industrialisés comme la Grande-Bretagne, la pollution thermique atteignait des niveaux importants, dès la fin des années 60, où l'élévation de la température des cours d'eau (ΔT moyen) variait de 6 à 9°C. En règle générale, l'élévation de température observée dans la plupart des cas excède déjà 5°C, avec les centrales fonctionnant aux combustibles fossiles. Ainsi, à Montereau, le ΔT moyen est de 7°C, les eaux de la Seine pouvant être portées aux environs de 30°C en période estivale (Laynaud et Allardi, 1975). L'étude détaillée de la pollution thermique provoquée par la station de Skawinka, sur la Vistule (Turoboyki, 1973), montre que ce fleuve dont le débit moyen est de 80 m^3/sec. subit un ΔT de 7°C également avec un maximum de 9,5°C la température estivale des eaux atteignant quelques 35°C en aval de la centrale.

On pourrait penser que le problème de la pollution thermique serait moins préoccupant dans les eaux littorales. Rien n'est moins évident. Un parc de 5 000 MW (el) dégage quotidiennement assez de chaleur pour élever, en théorie, de 3°C la température de 6,5 x 10^6 m^3 d'eau, sur une épaisseur de 5 m. Cette masse occuperait à la surface de la mer une tache de 8,5 km de diamètre, soit 56 km^2.

En réalité, divers facteurs interviennent soit pour favoriser soit au contraire pour entraver la dissipation de ces basses calories dans le milieu marin. Il s'agit en fait d'un phénomène dynamique mettant en jeu la dilution des eaux chaudes dans l'environnement, la convection, et, la diffusion thermique (échanges eaux-chaudes — eau de mer normale et océan-atmosphère).

Les courants, l'agitation de la surface de la mer par le vent interviennent de façon efficace pour atténuer l'étendue de la zone thermiquement poluée. Des modèles mathématiques ont été inventés pour calculer l'importance de la pollution thermique provoquée en milieu marin par la construction de grands parcs de centrales électronucléaires.

Dans le cas du site de Gravelines, près de Dunkerque, ces calculs suggèrent que pour un parc gigantesque de 10 GW (el) la tache de pollution correspondant à un ΔT de 0,5°C ne s'étalerait que sur 30 km^2 et celle du ΔT de 3°C sur seulement 5 km^2 (Daubert, 1975). Quelques réserves doivent être faites sur la validité de ces prévisions. Tout d'abord, on ne saurait en tirer des conclusions générales, la surface et la forme de la tâche de pollution dépendant en effet de la forme de la côte, en outre, il s'agit d'un cas très favorable à la dissipation thermique, la Manche présente en effet, au niveau de Gravelines, de très forts courants de marée. Il en irait tout autrement en Méditerranée par exemple (fig. 6.8). En outre, on peut critiquer la fiabilité de tels modèles à bien des égards. Les conclusions auxquelles ils conduisent dépendent, cela est évident, de la valeur fixée aux divers paramètres que comportent les expressions mathématiques

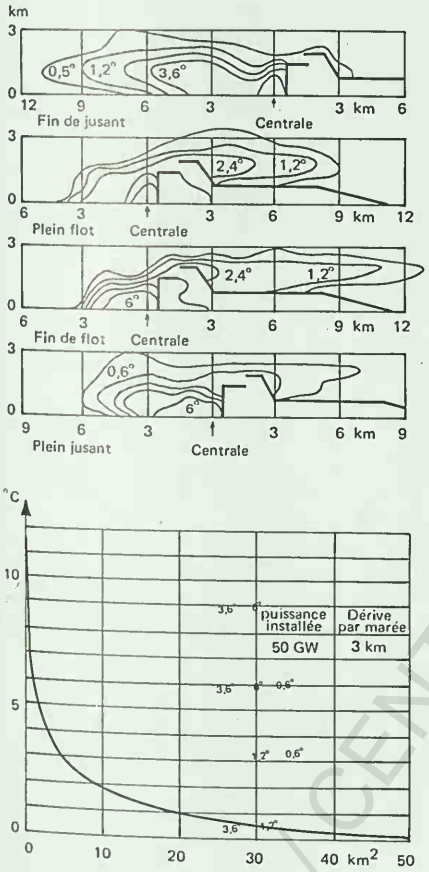


Figure 6.8
Effets de la pollution thermique sur la température des eaux littorales.
— A — Isothermes sur le site à l'abri du port de Gravelines pour un parc de centrales électronucléaires de 10 GW (el).
— B — Surfaces occupées par les eaux polluées par la chaleur à Gravelines.
Il s'agit dans un cas comme dans l'autre de résultats de calculs théoriques sur modèles mathématiques. (D'après Daubert, 1975).

LOCOSI / CENTRAL LIVERPOOL

sur lesquels ils sont établis. Dans le cas précité, on se doit de critiquer l'estimation assez optimiste du coefficient de diffusion (il serait cinquante fois plus élevé à Gravelines que la valeur admise par les britaniques !), et une estimation assez forte également du coefficient de transfert thermique (2,5 fois la valeur que lui assignent les experts d'outre-manche).

Enfin, une critique plus fondamentale de tels modèles tient au fait qu'ils ne prennent pas en considération les phénomènes de stratification d'importance primordiale dans les zones d'estuaire et *a fortiori* dans les baies. Ces phénomènes empêchent le mélange des eaux chaudes et froides de s'effectuer normalement, la difficulté de dissipation des calories étant d'autant plus forte que l'écart de température est plus élevé. Celui-ci entraîne en effet un accroissement des différences de densité et de viscosité. Cette stratification peut conduire dans certains cas défavorables à la formation de masses d'eau quasi indépendantes : "loupes" ou "mêches" qui propagent leurs effets fort loin du lieu d'émission, comme la photographie aérienne infra-rouge a pu le démontrer (cas de la centrale électronucléaire de Vandellos, en Espagne p.e.).

L'existence des phénomènes de stratification se traduit par un réchauffement excessif des eaux dont les conséquences biocœnotiques sont redoutables. Ainsi, à Biscayne Bay, en Floride, la centrale nucléaire de Turkey Point (720 MW el) a provoqué une élévation de 8°C de la température des eaux de surface sur quelques 3,5 km^2, valeur bien supérieure à celle calculée sur les modèles mathématiques précités qui, en outre, se rapportent à des parcs des réacteurs 8 à 15 fois plus puissants. A Turkey Point, tous les animaux marins ont péri, à la suite de ces rejets d'eaux chaudes, dans un rayon de 1,5 km autour du point d'émission. Ces divers phénomènes doivent conduire à proscrire toute implantation de site électronucléaire dans des baies ou en estuaire.

2) Effets sur la teneur en oxygène dissous.

L'élévation de la température des eaux modifie le taux d'oxygène dissous. En effet, la solubilité des gaz dans l'eau diminue quand croît leur température.

Le tableau XLIII A, *p* 326 figure la variation de teneur en oxygène dissous de l'eau entre 0 et 30°C. Sa lecture montre qu'en milieu marin, les eaux renferment à saturation une teneur en oxygène dissous plus faible que dans des eaux douces à une même température.

La formule empirique suivante permet de calculer la concentration en oxygène dissous dans l'eau de mer :

$$[O_2 \text{ dissous}] = \frac{80}{0{,}2\,t - 7{,}1}$$

où $[O_2]$ est exprimée en mg/l et t en degrés Celsius.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

On peut vérifier, à l'aide de cette expression, qu'aux environs de 20°C, la perte est de l'ordre de 2 % par degré d'élévation thermique.

Mais un autre phénomène intervient pour provoquer une déplétion de la teneur en oxygène des eaux polluées par la chaleur. Celui-ci résulte de l'importante concentration en matières organiques fermentescibles présente dans les fleuves des pays industrialisés — et dans les zones d'estuaire — cette pollution organique provient des rejets d'effluents urbains et des industries agroalimentaires. Elle va provoquer une consommation rapide de l'oxygène dissous par les bactéries aérobies, dont la prolifération et l'activité, qui suit la loi du $Q10$ sera favorisée par l'élévation de température. De façon générale, l'échauffement de l'eau, outre qu'il diminue sa teneur en oxygène, présente l'effet antagoniste d'augmenter la demande d'oxygène de l'ensemble des organismes poïkilothermes conformément à la loi d'activation d'Arrhénius. Une élévation de 10°C de la température des eaux multiplie de 2,2 fois les besoins respiratoires des animaux à sang froid.

Compte tenu de la biomasse importante présente dans les eaux eutrophes, qu'elles soient limniques ou marines, ces phénomènes vont contribuer efficacement à diminuer la teneur en oxygène dissous, à la limite, à l'asphysie des eaux.

3) Effets sur les autres gaz.

La pollution thermique diminue également la teneur des eaux en Azote et en gaz carbonique.

La déplétion des eaux en CO_2 dissous est plus sensible en milieu limnique qu'en milieu marin ; en effet, la légère alcalinité (pH 8,3) de l'eau de mer et son remarquable pouvoir tampon facilitent la solubilisation et la rétention des ions bicarbonates.

Bien que l'azote dissous n'aie aucun rôle biologique — sauf pour les organismes nitrifiants : bactéries et cyanophycées — la déplétion de ce gaz peut avoir des effets inattendus sur les animaux aquatiques. Clark signale la mort de poissons par embolie gazeuse, des microbulles d'azote apparaissant dans le sang avec pour conséquence des lésions de l'appareil natatoire et oculaire.

4) Effets sur la teneur des eaux en calcium.

Le rechauffement des eaux influe sur leur teneur en ion calcium est conditionnée par l'équation suivante :

$$(CO_3H)_2\,Ca \underset{\text{acidification}}{\overset{\text{échauffement}}{\rightleftharpoons}} CO_2 + H_2O + CO_3\,Ca$$

bicarbonate (soluble) — carbonate insoluble

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il en résulte qu'un échauffement excessif des eaux provoque une diminution de la concentration en ion Ca_{++} lequel est indispensable à l'ossification des téléostéens et à la constitution de la coquille des Mollusques ou de l'exosquelette des invertébrés marins les plus divers.

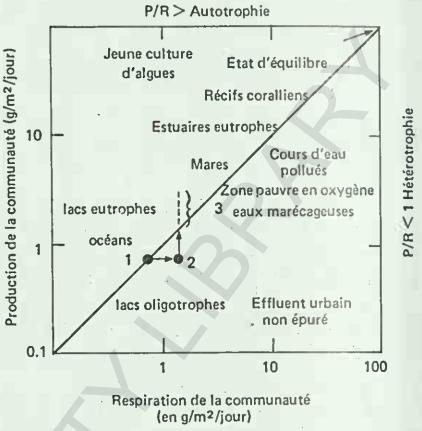


Figure 6.8a
Classification des écosystèmes aquatiques selon leur métabolisme. Celle-ci est fondée sur la valeur du rapport productivité primaire nette/ Respiration de la communauté (= P/R). (D'après Wright et Coll, 1971).

B. Effets sur les biocœnoses.

Les métabolismes de la communauté toute entière est modifié dans un écosystème pollué par la chaleur. L'accroissement de température va provoquer une augmentation immédiate de l'activité cellulaire et donc de la respiration de toute la biocœnose. Toutefois, la production primaire peut aussi être favorisée par une élévation de température. Le déséquilibre de la communauté par glissement d'un rapport $P/R > 1$ (autotrophie) vers un rapport $P/R < 1$ (hétérotrophie prédominante) n'est donc pas obligatoire et éventuellement, un nouvel équilibre peut s'établir (passage de 1 à 2 sur la figure 6.8a).

Par ailleurs, bien que la chaleur soit un facteur qui agisse à la fois sur la photosynthèse et la respiration de la biocœnose, ses effets peuvent être contrôlés par d'autres facteurs tels que la teneur en sels minéraux nutritifs. Ainsi les proliférations d'algues recquièrent un minimum de 0,015 ppm de phosphates et 0,2 ppm de nitrates.

Même si le rapport *P/R* d'une communauté n'est pas profondément modifié par la pollution thermique, celle-ci peut tout de même provoquer des bouleversements biocœnotiques. Il existe en effet de grands écarts dans l'étendue de l'intervalle de tolérance à la température et les thermopreferendum des diverses espèces constituant toute communauté limnique ou marine.

Le tableau XLIVB montre à titre d'exemple les températures supérieures tolérables observées dans les principaux groupes toxonomiques considérés.

En réalité, l'exposition à des températures de valeur supérieure au thermopreferendum, si elle n'est pas léthale se traduit déjà par des effets néfastes sur la croissance et la reproduction des espèces considérées.

1) Effets de la pollution thermique sur les producteurs primaires.

L'échauffement des eaux diminue la diversité du phytoplancton et de façon plus générale de toute la flore alguale. Les diatomées dont le thermopreferendum est assez bas, figurent parmi les premières espèces affectées. Une élévation de 10°C baisse de 2,5 fois la diversité spécifique du peuplement diatoméen des eaux (fig. 6.8b).

BU SCIENCES UNIVERSITY LIBRARY

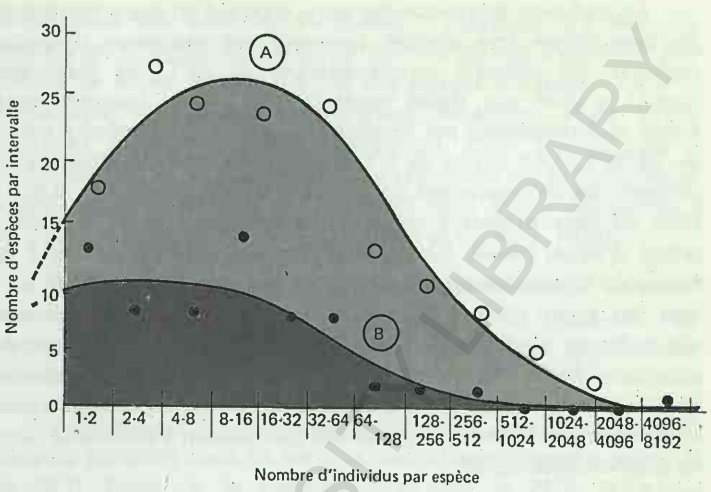


Figure 6.8b
Effets de la pollution thermique sur la diversité du peuplement de diatomées dans un cours d'eau. Une élévation de température de 10°C (graphique B) diminue de 2,5 fois le nombre d'espèces de diatomées présentés dans l'écosystème. En A est figuré le cas d'une rivière non polluée et un B une zone du même cours d'eau exposée à des rejets d'eau chaude. (D'après Patrick et Coll in Cairns 1972).

Tableau XLIV B — Limites supérieures des températures tolérables dans les principaux groupes taxonomiques constituant les biocœnoses limniques (in Brock, 1975).

Groupe	*Température*
Animaux	
Téléostéens et autres vertébrés aquatiques	38°C
Insectes	45-50°C
Ostracodes (crustacés)	49-50°C
Protozoaires	50°C
Végétaux	
Macrophytes vasculaires	45°C
Bryophytes	50°C
Algues eucaryotes	50°C
Champignons	60°C
Procaryotes	
Cyanophycées	70-73°C
Bactéries autotrophes	70-73°C
Bactéries hétérotrophes	99°C

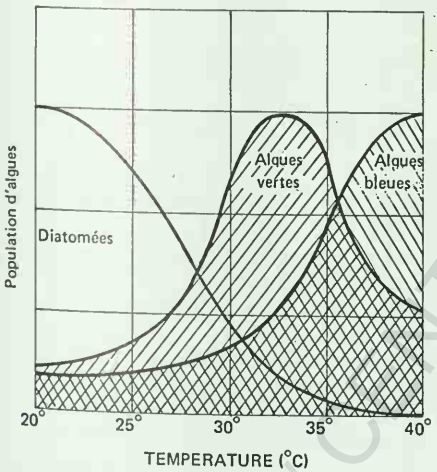


Figure 6.8C
Succession dans la phytocoenose alguale consécutive à la pollution thermique. A partir de 25°C, les diatomées sont progressivement remplacés par les chlorophycées lesquelles laissent à leur tour la place aux cyanophycées vers 35°C. (D'après Wright et Coll, 1971).

Toutefois, la pollution thermique peut provoquer, au contraire, la pullulation de quelques espèces de diatomées particulièrement thermophile. Diverses *Navicula* sp. (in Khalanski, 1975) se sont ainsi multipliées de façon anormale en aval de la centrale de Porcheville, sur la Seine ; Turoboyski (1973) note une prolifération de plusieurs espèces du même genre ainsi que de *Surirella ovata* à la suite du réchauffement de la Vistule par la centrale de Skawinka.

BCU - UNIVERSITY LIBRARY

La pollution thermique des eaux, en sus d'un appauvrissement phytocœnotique très sensible, provoque une succession d'espèces végétales. On constate qu'aux environs de 25°C, les diatomées laissent la place aux algues vertes (chlorophycées) lesquelles sont à leur tour remplacées par les algues bleues (cyanophycées) à partir de 33-35°C. Une dérive de 8°C sépare l'optimum de productivité primaire des chlorophycées de celui des cyanophycées (fig. 6,8 d). Dans les eaux sujettes à un échauffement intempestif, la prolifération d'algues bleues (*Oscillatoria limosa*) peut donner lieu à la formation d'importantes masses flottantes qui encombrent la surface des cours d'eau pollués. Cette multiplication anormale des algues bleues n'est pas favorable aux invertébrés et aux vertébrés aquatiques herbivores car elles sont de qualité alimentaire moindre que les chrorophycées et les diatomées. En outre, les cyanophycées renferment des toxines (biliprotéines) qui peuvent s'accumuler dans les chaînes alimentaires.

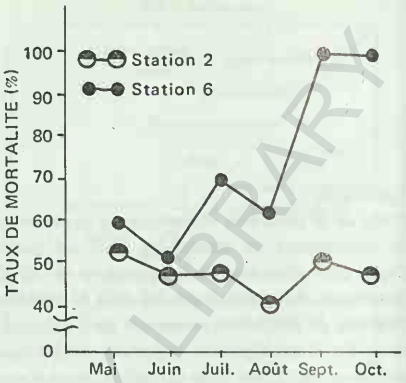


Figure 6.8d
Evolution du taux de mortalité du Mollusque Gastéropode Bithynia tentaculata *dans une zone non polluée (station 2) et polluée par des rejets d'eau chaude d'une centrale électronucléaire (station 6) du fleuve St Laurent pendant l'été 1972 (d'après Vaillancourt et Couture, 1975).*

2) Effets sur les Invertébrés.

Le zooplancton peut être fortement affecté par la pollution thermique.

Les cladocères (*Daphnia, Moinia p.e*) présenteront une nette sensibilité à l'échauffement des eaux. A 30°C, la longévité moyenne des *Daphnia* est trois fois plus faible qu'à 15°C.

Les copépodes, qu'ils soient limniques ou marins supportent mal la pollution thermique (*in* Peres, 1976). Les gammarides, qui jouent un rôle important dans l'alimentation de certains stades juvéniles chez les poissons prédateurs, en particulier des Salmonides, sont dans l'ensemble assez sensibles à l'échauffement des eaux.

Diverses larves d'insectes dont le rôle trophique pour la faune ichtyenne est absolument capital en milieux dulçaquicoles figurent parmi les premières victimes de la pollution thermique. Tel est le cas des larves d'Ephémères, de Perlides, de Trichoptères et d'odonates, dont beaucoup d'espèces sont des sténothermes d'eaux fraîches.

Même les odonates, qui peuvent se multiplier dans des milieux limniques de température relativement élevée sont très sensibles au réchauffement des eaux. Gentry et Coll. (1975) ont montré que les réacteurs électronucléaires de la Savannah river avaient provoqué une raréfaction drastique de la plupart des espèces de libellules. Sur cinq sous-familles d'odonates, une seule, celle des *Libellulinae*, renferme des espèces qui se sont révélées capables de s'adapter au réchauffement des eaux, dans certaines limites toutefois.

Parmi les autres éléments de la faune benthique les mollusques montrent aussi une grande sensibilité à la pollution thermique. A la centrale nucléaire de Gentilly (Québec), une hausse de 10°C de la

BOUVET CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

température des eaux du St-Laurent a provoqué une mortalité absolue de la faune malacologique sur une surface d'eaux peu profondes de 40 ha. Aucun individu des espèces suivantes : *Bithynia tentaculata, Amnicola limosa, Valvata tricarinata, Physa girina, Helisoma trivolvis* et *Pisidium amnicum,* n'ont survécu dans la partie centrale de la zone polluée. La croissance des *Bithynia tentaculata* s'est avérée négligeable dans une zone d'eaux réchauffées à 6°C au-dessus de la normale (Vuillancourt et Couture, 1975).

Bien que la pollution thermique des eaux provoque, en conséquence, une nette diminution de diversité de la zoocœnose benthique, certaines espèces d'invertébrés peuvent être favorisées par cette dernière.

A Montereau, les Ectoproctes *Plumatella repens* et *Plumatella fungosa* pullulent dans les eaux de température comprise entre 23 et 26°C. Toutefois, ils disparaissent au delà de 27°C. On a également observé en aval de la centrale nucléaire de Chinon une extraordinaire prolifération du Rotifère *Lacinularia flosculosa.* Ces organismes périphytiques couvrent de leurs colonies tous les supports immergés disponibles. Le maximum de densité des populations de ce Rotifère est relevé au niveau du rejet de la centrale où le ΔT moyen est de 6°C. On y dénombre jusqu'à 5 130 individus par cm^2. Il semblerait toutefois que ces pullulations, bien qu'elles soient en corrélation avec l'échauffement des eaux, dépendent aussi d'autres facteurs, car on a relevé la présence de ce Rotifère dans d'autres stations de ce fleuve hors de l'influence des rejets thermiques (*nec* Khalanski, 1975).

Les invertébrés marins, adaptés à un milieu dont les fluctuations naturelles de température sont beaucoup plus faibles que dans les écosystèmes limniques, présentent une sténothermie beaucoup plus étroite que celle de leurs homologues dulçaquicoles. Ils possèdent en conséquence une plus forte sensibilité à la pollution thermique.

Paradoxe en apparence seulement, la faune des mers chaudes paraît encore plus vulnérable que celle des mers tempérées froides. Les quelques études réalisées sur les conséquences de l'échauffement des zones littorales tropicales montre que la pollution thermique de ces eaux provoque une forte diminution de la diversité des biocœnoses.

Le tableau XLIVC résume les recherches de Kolehmainen et Coll. (1975) sur les conséquences de la pollution d'une zone littorale de Porto-Rico par une centrale thermique classique de 320 MW. Dans la zone la plus polluée (temp. moyenne de 37,1°), la biocœnose benthique ne compte que 15 espèces contre 96 dans la zone témoin non polluée où la température moyenne des eaux est de 30°C).

On explique la plus faible tolérance des animaux des mers chaudes à toute élévation de température par le fait que ces organis-

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

mes vivent à des températures plus rapprochées du maximum toléré par les espèces considérées que leurs homologues des mers froides ou tempérées.

Tableau XLIV C — Variation du nombre d'espèces en fonction de la température de l'eau de mer à Mangrove Root, Porto-Rico (D'après Kolehmainen et Coll., 1975).

Stations	*Témoin*	*Polluées par la chaleur*						
		1	2	3	4	5	6	7
Espèces \ Température l'eau	30°	31,1°	31,8°	33,2°	34,5°	35,5°	36,7°	37,1°
Nombres d'espèces d'algues	6	3	5	8	7	4	5	5
Nombre d'espèces d'invertébrés	90	45	70	67	58	25	21	10
Nombre total d'espèces	96	48	75	75	65	29	26	15

3) Effets sur les poissons

Il est difficile d'analyser les effets de la pollution thermique sur les poissons sans prendre en considération les phénomènes d'acclimatation. Ici encore, il convient de distinguer les cas des milieux limniques et océaniques.

Dans les eaux douces continentales, la température varie au cours du cycle annuel de 0°C à 30°C sous les moyennes latitudes. La faune autochtone est adaptée à ces variations saisonnières. Si l'on tient compte de l'étendue de l'intervalle de tolérance des poissons dulçaquicoles de nos pays, on constate qu'ils peuvent même résister à des températures situées au delà de ses limites.

En réalité, la vitesse à laquelle adviennent des variations de température est aussi importante pour la survie des poissons qui les subissent que la valeur absolue des écarts. De rapides fluctuations de température, même comprises à l'intérieur de l'intervalle de tolérance, peuvent avoir des conséquences mortelles pour les téléostéens et autres vertébrés aquatiques qui sont exposés à ces dernières.

On peut définir pour chaque espèce une température léthale inférieure (TLI), au-dessous de laquelle l'espèce ne peut survivre. Celle-ci est en général de l'ordre de 0°C pour la plupart des poissons d'eau douce indigènes mais elle peut être nettement supérieure à cette dernière pour certaines espèces thermophiles.

BUJAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La température léthale supérieure (TLS) marque la limite au-dessus de laquelle les poissons périssent par excès de chaleur.

L'intervalle de tolérance est compris entre ces deux bornes.

Une zone de résistance existe dont la limite supérieure et inférieure correspondent aux températures minimales provoquant la mort instantanée.

ACCLIMATATION

Des poissons exposés pendant un certain temps à une température déterminée dite d'acclimatation vont s'adapter avec pour conséquence une élévation de la température léthale supérieure (TLS).

Chez le gardon, la TLS augmente de 1°C chaque fois que la température d'acclimatation croît de 3°C. Chez le saumon de fontaine *(Salvelinus fontinalis)*, les capacités d'acclimatation sont plus limitées puisque une hausse de 7°C ne provoque qu'une augmentation de 1°C de la TLS. Il existe cependant une limite de température au-delà de laquelle l'acclimatation est impossible, celle qui provoque la mort instantanée.

La température limite d'acclimatation est de 37°C pour le poisson chat *(Ameirus catus)*, de 34°C pour le gardon et seulement de 23,9°C pour le saumon du Pacifique *(Oncorrhynchus Keta)*.

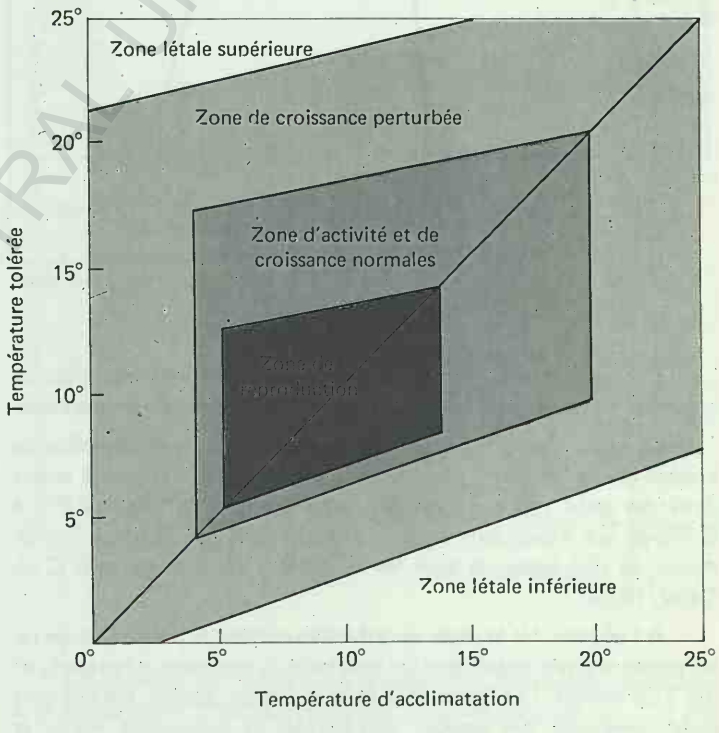


Figure 6.8e
*Action de la température sur le saumon du Pacifique (*Oncorrhynchus nerka*). La température tolérée par les diverses activités vitales dépend de la température d'acclimatisation à laquelle le jeune saumon est soumis. On remarque que la zone thermique dans laquelle la reproduction est possible est la plus étroite de toutes. C'est donc ce domaine thermique qui doit servir de base pour l'établissement de normes de rejet dans les cours d'eaux à Salmonides (in Dajoz, 1970).*

B.C.U. "I. EMINESCU" IAȘI
GEOLOGIE-GEOGRAFIE
BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

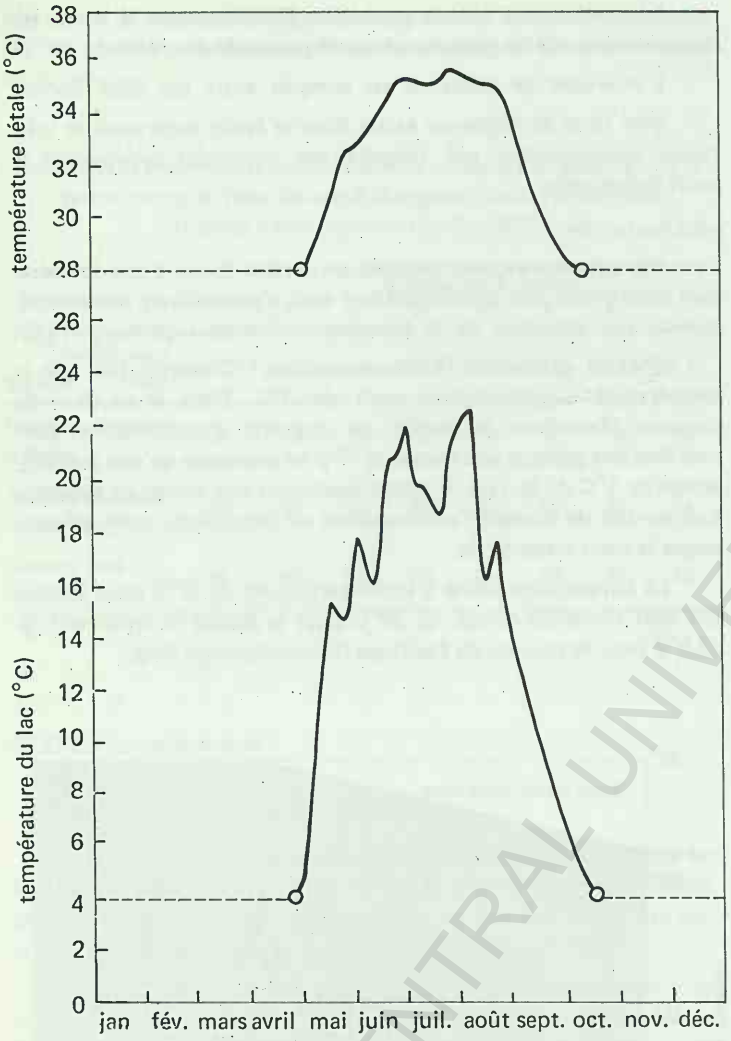


Figure 6.8f
Variations saisonnières de la température léthale supérieure du poisson-chat (courbe du haut) en fonction des températures moyennes mensuelles du milieu lacustre où vit cette espèce (courbe du bas). (D'après Brett, in Dajoz, 1970).

En règle générale, les salmonides, poissons sténothermes, ne peuvent s'adapter qu'à de faibles fluctuations de température.

Le record de sténothermie est détenu par des poissons de l'océan glacial antarctique du genre *Trematomus*. Ces espèces vivent dans des eaux très froides dont la température est de — 2,5°C à 0,1°C et qui n'excèdent en aucun cas 1 à 2°C. La TLS des *Trematomus*, la plus basse de tous les téléostéens est à peine de 6°C (*in* Dajoz, 1970).

A l'opposé, les espèces eurythermes comme le poisson rouge ou les poissons-chats présentent un intervalle de tolérance très étendu et des TLS élevées. Les Cyprinidés (gardon, carpe, goujon, brème) sont dans l'ensemble des espèces eurythermes et supportent mieux la pollution thermique des eaux que les salmonides.

POLI MCGILL CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Au cours du cycle annuel, les poissons s'adaptent aux variations de température des eaux. La TLS s'élève pendant la période estivale et diminue en hiver.

Notons aussi qu'il existe des sous-espèces géographiques : les formes des régions froides sont moins résistantes aux fortes températures et plus résistantes au froid que celles des localités méridionales de l'aire de répartition de l'espèce considérée.

Lorsque les poissons peuvent se déplacer à l'intérieur d'un gradient thermique dans des conditions naturelles ou en laboratoire, ils s'installent dans une zone qui correspond à leur thermopreferendum.

Si l'on représente par un diagramme les variations de la température tolérée en fonction de la température d'acclimatation, on constate que les températures tolérées augmentent en fonction de la température d'acclimatation à laquelle le genre a été soumis.

La zone thermique dans laquelle la croissance est normale est moins étendue que celle dans laquelle la survie de l'espèce est possible. La zone de reproduction est la plus étroite de toutes celles correspondant aux diverses activités vitales.

L'étude des eaux continentales thermiquement polluées montre que les poissons présentent un maximum d'abondance dans les eaux lorsque celles-ci sont à la température correspondant à leur thermopreferendum et qu'ils se raréfient lorsque celles-ci sont plus élevées.

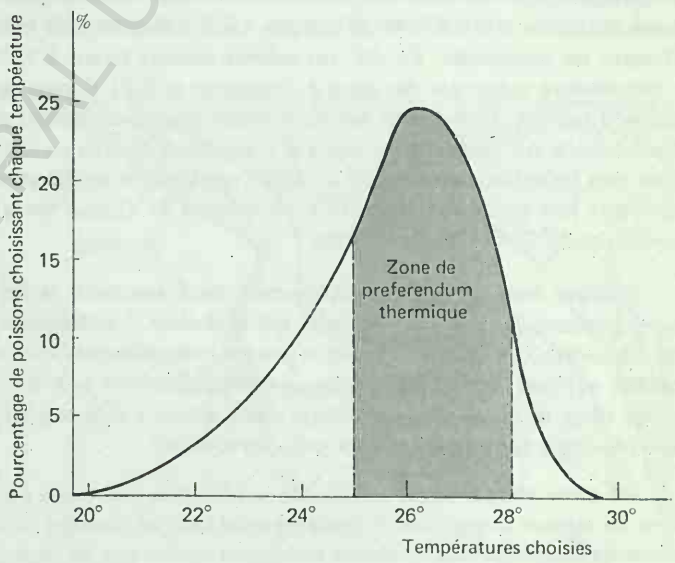


Figure 6.8g
Préférendum thermique du poisson Gisella nigricans. *On constate qu'environ 75 % des individus se groupent dans la zone de température correspondant à l'aire (en grisé) entre 25 et 28 °C. (in Dajoz, 1970).*

On constate par ailleurs que la sensibilité des diverses écophases à la température n'est pas identique chez les poissons. La TLS des œufs et des alevins est nettement plus faible que celle des adultes.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Un cas extrême est celui de la lotte dont les œufs exigent une température de 0,5 à 1°C pour que leur embryogénèse s'effectue de façon normale, et périssent en masse dès que celle-ci excède 1,5°C ! Les Corégones, salmonides lacustres de grande importance économique en certains pays, présentent un intervalle de tolérance compris entre 0 et 3°C pour leur développement embryonnaire. A l'opposé, il s'étend de 5 à 20°C pour le gardon et de 8 à 23°C pour la brème *(Abramis brama)*.

Dans de telles conditions, toute pollution thermique dont le ΔT paraîtrait minime en valeur absolue peut s'accompagner de conséquences catastrophiques si elle affecte des zones de frayères à salmonides. Pour ces mêmes téléostéens, d'importance halieuthique majeure, toute élévation de température se traduit par une baisse du rythme alimentaire, par une croissance pondérale plus lente, une maturité sexuelle et une date de frai plus précoces, enfin par une moindre longévité. Ce phénomène ne leur est d'ailleurs pas spécifique. Dans des conditions naturelles, on constate p.e que des brèmes de lacs frais de Carélie présentent une longévité supérieure à 18 ans alors que les individus de plus de 10 ans sont exceptionnels dans la Caspienne.

La prise en considération de ces divers effets de la pollution thermique sur les poissons a conduit les services de protection de l'environnement de divers pays et la F.A.O. à définir des normes de température pour les eaux continentales. En hiver, celles-ci préconisent de limiter à 5 à 6°C le ΔT moyen, toute élévation plus forte affectant les salmonides. En été, ces mêmes normes fixent à 23°C la température maximale des eaux à Corégones et à 21°C celle des rivières à saumon. Enfin, pour les cours d'eaux peuplés seulement de Cyprinidés, le ΔT tolérable est fixé à 9°C au-dessus des valeurs naturelles sans toutefois dépasser 30°C. Aux Etats-Unis, la température supérieure des eaux est fixée à 15°C en hiver et 21°C pour les salmonides et 26°C pour les Cyprinidés.

D'autres facteurs indirects concourent pour amoindrir la production secondaire des eaux polluées par la chaleur. La raréfaction des diatomées, de diverses larves d'insectes sténothermes d'eaux fraîches et bien oxygénées, provoque inéluctablement une diminution de la biomasse des téléostéens d'eau douce à régime prédateurs *(Percidae, centrarchidae, Esocidae, Salmonidae)*.

Un autre effet indirect néfaste de la pollution thermique concerne les espèces migratrices. Il concerne aussi bien les poissons potamotoques (saumons, aloses) venant pondre en rivière, que les espèces thalassotoques (anguilles) allant pondre en mer.

En effet, les migrateurs peuvent voir l'accès à leurs frayères interdit par un gradient thermique provoqué par le rejet d'eaux chaudes lequel peut atteindre plus de 10°C en quelques centaines de mètres (même si le ΔT moyen est nettement plus faible). Ce même

CUSHING CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

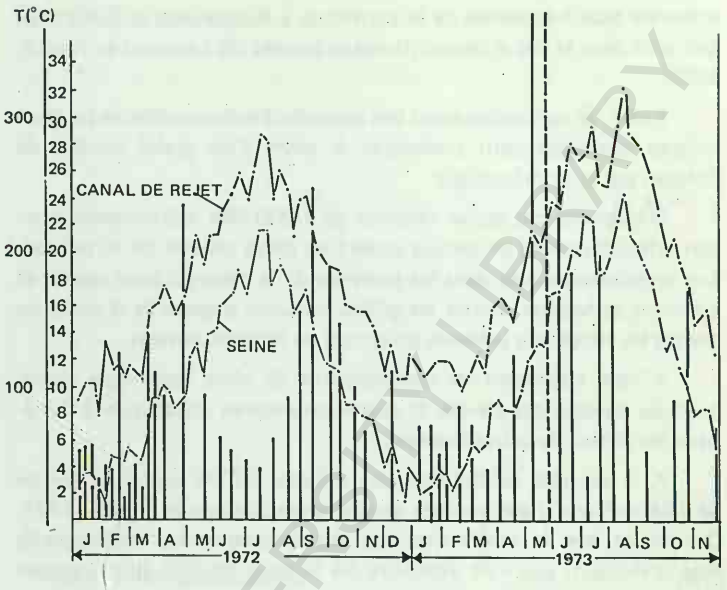


Figure 6.8h
Evolution des températures de la Seine en aval de la centrale thermique de Montereau et des effectifs de captures de poissons pendant la période Janvier 72 — Novembre 73. On remarque que le minimum des prises se situe entre Juin et Septembre correspond à la période où les eaux du fleuve sont à leur plus haute température. En revanche, les maxima de captures, figurés par des barres verticales, s'observent au printemps et à l'automne quand les eaux sont au thermopréférendum. (D'après Leynaud et Allardi, 1975).

gradient peut aussi arrêter la migration vers la mer des jeunes de ces espèces ou des anguilles adultes.

Un dernier effet néfaste de la pollution thermique tient en son rôle dans le développement de certaines maladies des téléostéens. Une élévation de 10°C a provoqué une extension incontestable de

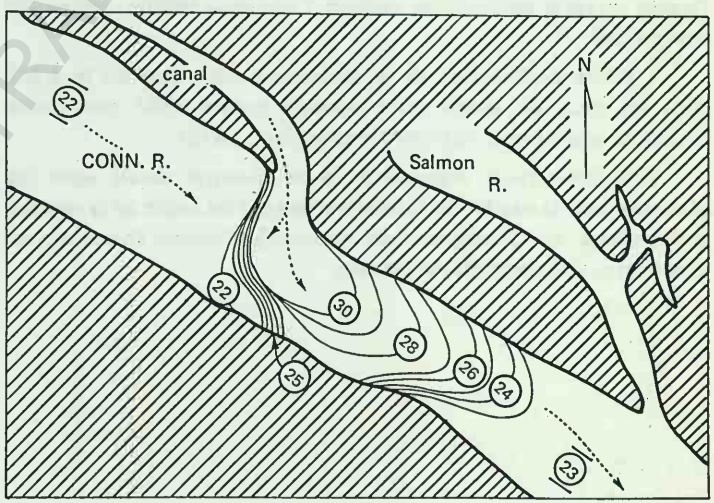


Figure 6.8i
Barrière thermique constituée par les rejets du circuit de refroidissement de la centrale nucléaire Connecticut Yankee (560 MW el) dans la rivière Connecticut (isothermes de surface). La variation de 8°C observée en aval du canal de décharge constitue un gradient thermique susceptible de dissuader les migrateurs Potamotoques comme l'Alose américaine (Alosa sapidissima) de remonter le cours d'eau pour rejoindre les lieux de frai de cette espèce. (D'après Merriman, 1971).

l'affection causée par le *Chondrococcus columnaris* observée aux Etats-Unis sur la Columbia river. De même, les gardons capturés dans le canal de rejet de la centrale de Montereau présenteraient des

atteintes plus fréquentes de la parasitose à *Bucephalus polymorphus* qui sévit dans la Seine depuis plusieurs années (*in* Leynaud et Allardi, 1975).

Enfin, le refroidissement des centrales électronucléaires ou thermiques classiques peut provoquer la mort d'un grand nombre de poisson par choc mécanique.

N'oublions pas qu'un réacteur de 1 000 MW (el) nécessite pour son refroidissement en circuit ouvert un débit moyen de 40 m^3/sec. Les organismes situés dans les environs de la centrale sont aspirés et viennent se heurter contre les grilles et autres dispositifs d'arrêts ou contre les structures internes du circuit de refroidissement.

A cela s'ajoutent les conséquences du choc thermique consécutif au passage des alevins et autres organismes aquatiques à l'intérieur du circuit de refroidissement.

A la centrale de Brayton point, Clark (1974) avance le chiffre de 164 millions d'alevins tués en une seule journée le 2 juillet 1971. On estime que la raréfaction des populations de bar rayé dans la baie d'Hudson, pourrait atteindre 64 % pour les plus jeunes classes d'âge par l'effet conjugué de ces phénomènes de choc mécanique et thermique.

Les effets de la pollution thermique sur l'ichtyofaune marine n'ont jusqu'à présent donné lieu qu'à un nombre restreint de publications.

L'analyse de la diversité du peuplement de téléostéens des eaux littorales du Porto-Rico dans une zone polluée par les rejets d'eau chaude d'une centrale thermique classique a montré une baisse significative de cette dernière par rapport à une zone témoin comparable non polluée.

L'indice de Shannon de la biocoenose ichtyenne est de 5 309 dans les eaux de température normale contre 3 661 pour celles situées au site du rejet (Kolehmainen et Coll., 1975).

Une diminution importante de la diversité aurait aussi été observée dans la région du littoral polluée par les rejets de la centrale de Vandelos, en Catalogne, mais aucune publication formelle n'est venue jusqu'à présent étayer ces faits.

BCU IASI / GRAND PUBLIC UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE VII

Chapitre VII — La pollution nucléaire 407

Notions de radiobiologie 410

Effets biologiques des radiations ionisantes, radiosensibilité comparée des espèces animales et végétales 413

Radiosensibilité des êtres vivants aux doses léthales 414

Effet des doses subléthales 416

Conséquences écologiques des retombées radioactives 426

Conséquences écologiques de la pollution par l'industrie nucléaire 435

La destinée des résidus dans la biosphère 441

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

VII
LA POLLUTION NUCLEAIRE

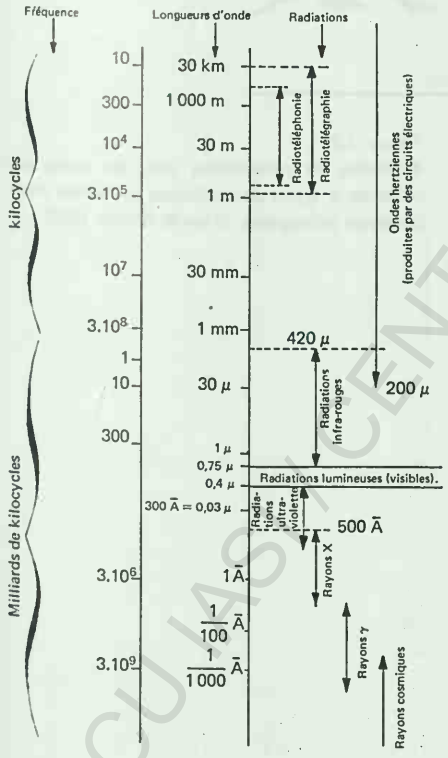


Figure 7.1
La gamme des radiations

Les rayonnements sont d'origine et de nature physique très variées. Certains, comme les rayons X ou γ sont constitués par des ondes électromagnétiques de très haute fréquence (fig. 7.1) ; d'autres, comme les rayons β, sont composés d'électrons dont la vitesse approche celle de la lumière. Enfin, il existe divers types de radiations constitués par des particules élémentaires d'origine nucléaire (neutrons, rayons cosmiques et autres nucléons) ou par des noyaux d'hélium (rayons α).

Qu'il s'agisse d'ondes électromagnétiques ou de particules élémentaires en mouvement, toutes ces radiations présentent un certain nombre de propriétés communes. Elles sont invisibles, se déplacent à des vitesses très élevées et peuvent pénétrer dans les organismes vivants à des profondeurs variables selon la nature du rayonnement. Ainsi, les rayons α sont arrêtés par les couches les plus superficielles de la peau, les rayons β peuvent traverser plusieurs centimètres de tissus, quant aux rayons γ et aux rayonnements cosmiques, ils sont capables de cheminer au travers de blindages au plomb épais de plusieurs mètres dans certains cas ! (fig. 7.2).

Les neutrons constituent un autre type de radiations, encore plus dangereux que les précédents, à quantité égale d'énergie absorbée par l'organisme. Cela tient à leur masse importante, à leur absence de charge électrique et à leur énergie cinétique élevée. Ils peuvent causer de graves dommages dans les cellules,comme par exemple l'arrachement de fragments de chaînes d'acide nucléique. Cependant, les neutrons ne présentent pas une grande importance sur le plan écologique car ils ne se rencontrent qu'au voisinage immédiat des réacteurs ou au moment d'une explosion nucléaire.

Les diverses radiations dont nous venons de parler sont dites ionisantes car elles possèdent la propriété d'arracher les électrons aux couches périphériques des atomes, donc de les ioniser. Les ions

BCU LAUSANNE CENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

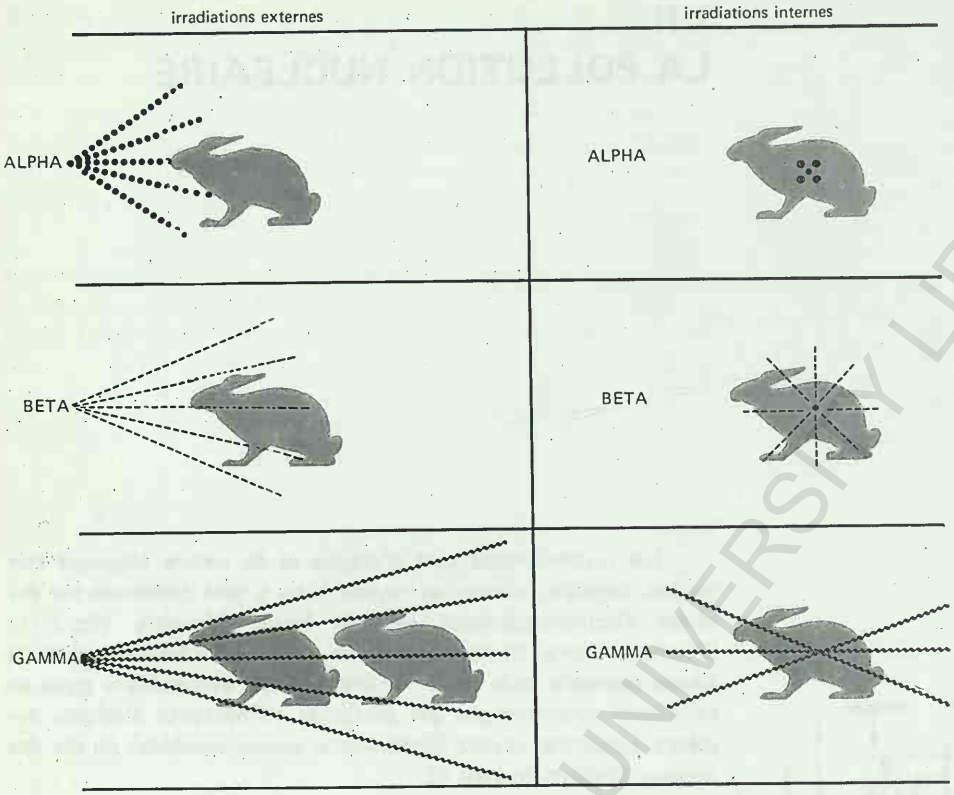


Figure 7.2
Modalités de pénétration dans les tissus des principaux types de radiations ionisantes d'importance écologique. D'après Odum 1959.

ainsi produits présentent une haute réactivité chimique. Ils sont capables de modifier divers constituants cellulaires et provoquent, par exemple, la formation de peroxydes et autres composés cytotoxiques. Les rayons ionisants sont donc la cause d'importants dommages cellulaires lorsqu'ils traversent un organisme et *a fortiori* quand ils sont produits à l'intérieur de celui-ci.

Une forte dose d'irradiation, qui détermine l'apparition de nombreux ions, provoquera, à plus ou moins bref délai, la mort des cellules exposées. De faibles doses peuvent être supportées sans dommage apparent mais sont capables d'induire des modifications structurales irréversibles de l'ADN (mutations).

Depuis ses lointaines origines, la vie terrestre a dû s'accommoder des radiations ambiantes, en particulier lors du passage en milieu continental qui n'offre pas une protection comparable à celle d'un écran d'eau contre l'irradiation externe.

On relève en effet, dans tous les biotopes naturels, la présence permanente d'une certaine quantité de rayonnements en l'absence de toute source technologique. On décèle des radiations aussi bien à la surface des continents que dans les mers. Celles-ci émanent de la lithosphère et de l'espace.

BRUNEL UNIVERSITY LIBRARY

La croûte terrestre émet divers types de rayonnements, en particulier des γ, car elle renferme divers radionucléides naturels : uranium, thorium, radium, actinium, etc. En outre on rencontre, dans les sols et les eaux, deux radionucléides de grande importance biologique ; le potassium K^{40} et le carbone C^{14}, qui sont activement incorporés par les êtres vivants. Enfin, du radon, gaz rare produit par la désintégration du radium, se rencontre naturellement dans l'atmosphère.

Mais la biosphère est aussi baignée par des rayonnements qui proviennent de l'espace : "vents solaires", rayons cosmiques de haute énergie. Ces derniers sont non seulement responsables d'une irradiation des animaux terrestres mais encore sont la cause de la synthèse de tritium et du C^{14} dans la haute atmosphère, par interaction de certaines particules qui les composent avec les noyaux d'azote.

Notons aussi que les rayons ultraviolets du flux solaire ne sont pas dépourvus d'activité biologique, quoique de faible énergie au niveau du sol ([1]). Leur action bactéricide est bien connue, et leurs effets mutagènes ne sont plus à démontrer. Ils sont aussi responsables de la fréquence élevée de cancers de la face que l'on observe chez les marins qui naviguent dans des mers chaudes, exposés en permanence à une forte irradiation ultraviolette du visage.

(1) Aucune radiation ultraviolette de longueur d'onde inférieure à 200 nm ne parvient au niveau de la mer. Elles sont en effet absorbées par l'écran d'ozone et les hautes couches troposphériques.

Tout être vivant est donc soumis dans des conditions naturelles à une exposition permanente aux diverses sources d'irradiation externe ou interne (K^{40} ou C^{14}), dont l'intensité varie beaucoup selon l'habitat considéré. Celle-ci est cependant assez faible en règle générale. L'adaptation de notre espèce aux rayonnements ionisants paraît satisfaisante dans les limites des taux d'irradiation que l'on peut relever dans la majorité des biotopes continentaux.

Toutefois les radiations ionisantes représentent dans la biosphère un risque potentiel de lésions pathologiques (somatiques) ou germinales (génétiques), dont l'importance s'est considérablement accrue au cours des dernières décennies à la suite de la découverte et du développement de l'énergie nucléaire à des fins militaires ou pacifiques.

L'usage bénéfique des radiations ionisantes pour la production d'énergie électrique, celui des radioéléments dans l'industrie ou la recherche scientifique, le recours systématique et parfois abusif aux explorations radiologiques dans la pratique médicale, et même l'exposition fréquente aux rayons produits par les tubes cathodiques . . . des écrans de télévision, accroissent beaucoup les sources de contamination interne ou d'irradiation externe de l'homme moderne.

Il nous semble donc nécessaire de préciser quelques notions élémentaires de radiobiologie avant d'aller plus loin dans l'étude des conséquences écologiques de la pollution radioactive.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Certains isotopes (1) sont radioactifs, on les dénomme radioisotopes. A la cinquantaine de radioisotopes présents à l'état naturel dans l'écosphère, l'homme a ajouté deux cents radioéléments artificiels depuis leur découverte par Frédéric et Irène Joliot-Curie en 1935.

La radioactivité provient de la transformation spontanée d'un corps simple en d'autres éléments de nombre atomique différent, avec émission de rayonnements variables selon le corps considéré.

Un corps radioactif se désintègre : sa masse décroît en progression géométrique en fonction du temps. En théorie, il faut une durée infinie pour que la totalité du radioélément disparaisse. On appelle *période* d'un radioisotope le temps au bout duquel sa masse aura diminué de moitié. Celle-ci est des plus variables selon le corps simple considéré. Elle est par exemple de 2 heures pour l'argon 41 et de 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238.

Un corollaire fondamental sur le plan écologique en découle : laisser au radioisotope le temps de se désintégrer spontanément est la seule façon pratique de faire disparaître leur radioactivité. En conséquence, la lutte contre la pollution nucléaire ne peut guère être que préventive. Il n'existe aucune possibilité de biodégradation ou autre mécanisme qui puisse permettre d'éliminer ce genre de contamination du milieu naturel.

L'importance écologique des divers radioisotopes n'est pas comparable. On concevra aisément que les radionucléides à période brève, inférieure à 2 jours, par exemple, ne sont pas très dangereux, sauf en cas d'exposition directe, car ils ne peuvent persister à des doses significatives que pendant une durée assez courte dans un biotope accidentellement contaminé. A l'opposé, un radionucléide de très longue période comme l'uranium 238 est à peu près inoffensif car il émet une très faible quantité de rayonnement par unité de temps.

Les radioéléments les plus dangereux seront donc ceux dont la période sera de valeur moyenne, c'est-à-dire se comptera en semaines, en mois ou en années. Ils auront en effet le temps de s'accumuler dans les divers organismes et, comme nous l'avons déjà vu, (cf. chapitre III, p. 154-156) de se concentrer dans les chaînes trophiques.

Par ailleurs, à niveau de contamination identique dans tout écosystème, les effets des radioisotopes de corps simples qui sont des constituants fondamentaux de la matière vivante (carbone ^{14}, phosphore ^{32}, calcium ^{45}, tritium, soufre ^{35}, etc . . .) seront beaucoup plus redoutables pour la biocœnose que des composés plus exotiques, peu ou pas absorbés par les organismes. Il en est de même des gaz rares radioactifs qu'aucun être vivant ne pourra *a fortiori* fixer dans ses cellules.

(1) Deux isotopes sont des éléments de même nombre atomique mais de masse atomique différente. Pourvus du même nombre d'électrons, ils présentent donc des propriétés chimiques identiques.

MCGILL UNIVERSITY LIBRARY

L'analogie de leurs propriétés chimiques respectives avec le calcium et le potassium fait du strontium^{90} et du césium^{137} les plus redoutables radioisotopes qui puissent contaminer l'environnement à la suite de rejets de déchets ou de retombées consécutives à des explosions nucléaires dans l'atmosphère. En effet, le strontium s'incorpore très facilement au squelette des vertébrés par suite de sa parenté avec le calcium tandis que le césium va s'accumuler dans les muscles (fig. 7.3) à l'image du potassium. Comme la période de ces radioéléments est respectivement de 28 et 33 ans (tableau LIV), ils persisteront dans l'organisme contaminé et peuvent s'y accumuler au point de compromettre sa santé.

Enfin, le degré de nocivité des radionucléides est conditionné par l'énergie des particules qu'ils émettent. Ainsi, bien que les rayons α du plutonium^{239} soient très peu pénétrants, ils sont doués néanmoins d'une très haute énergie, supérieure à 3 MeV (tableau LIV). Chacune de ces particules α peut ioniser à elle seule 100 000 molécules En revanche, une particule β, même très énergétique, supérieure à 1 MeV par exemple (celles du Sr^{90}), ne peut ioniser que 6 300 molécules.

Afin de pouvoir comparer les effets des radiations ionisantes sur les individus, les espèces et les biocœnoses, il est nécessaire de disposer d'unités qui permettent de comparer le degré de contamination des diverses biocœnoses et les quantités de radiations reçues par chaque organisme.

Tableau LIV — Principaux radioisotopes d'importance écologique

Gr.	*Radioisotope*	*Période*	*Radiations émises*		
			α	β	γ
A	Carbone (C^{14})	5568 ans		+	
	Tritium (H^3)	12,4 ans		+	
	Phosphore (P^{32})	14,5 jours		+++	
	Soufre (S^{35})	87,1 jours		+	
	Calcium (Ca^{45})	160 jours		++	
	Sodium (Na^{24})	15 heures		+++	+++
	Potassium (K^{42})	12,4 heures		+++	++
	Potassium (K^{40})	1,3 milliard d'années		++	++
	Fer (Fe^{59})	45 jours		++	+++
	Manganèse (Mn^{54})	300 jours		++	++
	Iode (I^{131})	8 jours		++	++
B	Strontium (Sr^{90})	27,7 ans		++	
	Césium (Cs^{137})	32 ans		++	+
	Cérium (Ce^{144})	285 jours		++	+
	Ruthenium (Ru^{106})	1 an		+	
	Yttrium (Yt^{91})	61 jours		+++	++
	Plutonium (Pu^{239})	24 000 ans	++++		++
C	Argon (A^{41})	2 heures		++	
	Krypton (Kr^{85})	10 ans		+	
	Xenon (Xe^{133})	5 jours		+++	

Groupe A — Radioisotopes de constituants fondamentaux de la matière vivante.

Groupe B — Eléments contenus en quantité significative dans les produits de fission donc libérés dans l'environnement avec les retombées radioactives ou les rejets de résidus radioactifs accidentels ou volontaires.

Groupe C — Gaz rares produits par les réacteurs de puissance

(+, énergie inférieure à 0,2 MeV ;
++, énergie comprise entre 0,2 et 1 MeV ;
+++, énergie supérieure à 3 MeV.

BCU CENTRAL UNIVERSITAIRE

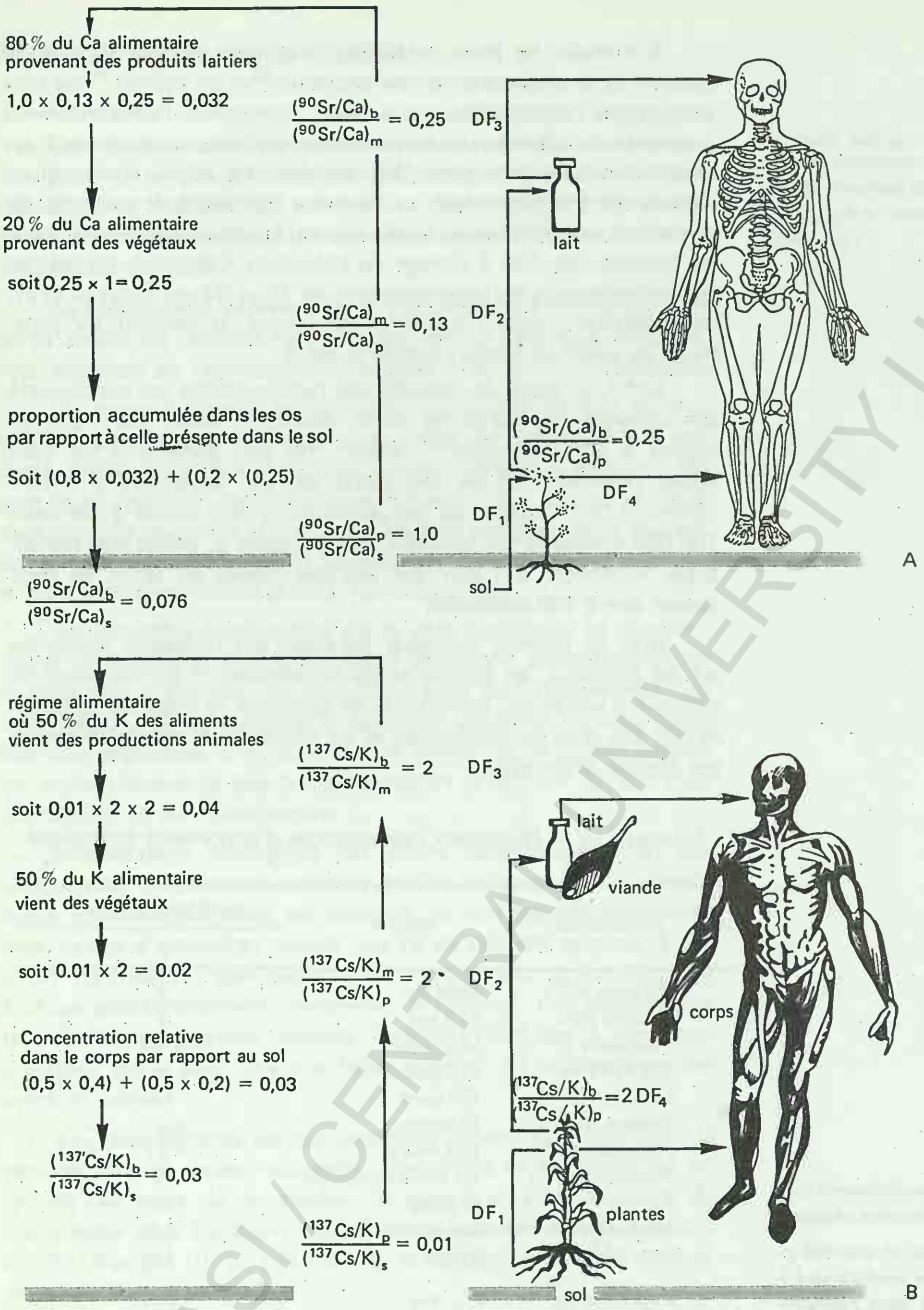


Figure 7.3

Modèles de transfert du ^{90}Sr et du ^{137}Cs dans les chaînes trophiques humaines les plus exposées à la contamination par ces redoutables radionucléïdes. Dans le cas du ^{90}Sr, l'homme est surtout menacé par la consommation de produits laitiers (A). L'alimentation avec des produits animaux et végétaux intervient au contraire de façon égale dans la contamination de notre organisme par le ^{137}Cs (B).

On constate que la proportion relative en Sr par rapport au Ca est la même dans les tissus végétaux et le sol. L'organisme animal assimile plus facilement, au contraire, le Calcium que le Strontium : (Sr/Ca)b/(Sr/Ca) lait est par exemple inférieur à un. Les modalités de circulation du Cs dans les chaînes trophiques sont fort différentes. Ici, les plantes absorbent proportionnellement plus de Potassium que de cesium des sols, alors que les tissus animaux tendent à concentrer le Cs par rapport au K : (Cs/K)b/(Cs/K)p est plus grand que 1. (b = corps, m = lait, p = plante, s = sol, DF = Fixation trophique). D'après Langham in Fowler "Radioactive Fallout", Elsevier ed. 1965, p. 11.

CNEN/IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La plus ancienne unité de mesure de rayonnement est le *curie* (C). Celui-ci correspond à la désintégration de $3,7 \times 10^{10}$ atomes par seconde, soit, avec une assez bonne approximation, à la quantité de radiations émises pendant ce laps de temps par un gramme de radium. Cette quantité est très élevée, aussi les radioécologistes ont-ils souvent recours au microcurie (μC), soit 10^{-6}C, au nanocurie (millimicrocurie) (mμC = 10^{-9} C), voire au picocurie ($\mu\mu$C = 10^{-12}C).

Le *Rad* (rad) ([1]) est l'unité fondamentale de la radiobiologie. Elle se définit comme la dose de rayonnement correspondant à l'absorption par un organisme d'une énergie de 100 ergs par gramme de tissu.

Le *Rem* est une unité qui en dérive. Elle prend en considération un facteur de correction appelé coefficient d'efficacité biologique ou plus exactement efficacité biologique relative (E.B.R.). Celui-ci tient compte du fait que l'absorption des radiations ionisantes dépend de leur nature. Les rayons α, β, γ ou X, les neutrons, ne présentent pas les mêmes effets, à quantité d'énergie incidente équivalente. Ainsi, l'E.B.R. d'un neutron lent sera 10 fois supérieure à celle d'un rayonnement γ ou X de 320 KeV, toutes choses égales par ailleurs.

Dans le cas où l'on se limite à des rayonnements électromagnétiques γ ou X, de 320 keV, on peut écrire 1 rad $\neq$ 1 rem.

Effets biologiques des radiations ionisantes, radiosensibilité comparée des espèces animales et végétales.

Les effets des radiations ionisantes peuvent se répartir en deux groupes distincts : effets somatiques et effets germinaux.

Les premiers affectent la physiologie de l'individu exposé et provoquent des troubles variés allant de la mort quasi-instantanée jusqu'à une réduction significative de l'espérance moyenne de vie (Tableau LV, p. 373 et fig. 7.8, p. 377).

D'autres effets concernent la gamétogenèse. Diverses recherches ont montré que les cellules en méïose étaient particulièrement vulnérables aux radiations ionisantes ce qui explique entre autres l'action mutagène des rayonnements.

L'induction de mutations subléthales ou léthales dans la descendance se rapporte à trois phénomènes distincts.

Le premier résulte d'altérations chromosomiques : translocations, apparition d'extra-fragments, dues à l'arrachage de segments de chromatides par les rayons (fig. 7.4). Les ovocytes en méïose sont très vulnérables (Peterman dans Würgler, 1967).

Les deux autres phénomènes se caractérisent par des altérations chimiques du code génétique. Les rayons ionisants font apparaître dans le noyau des radicaux libres qui réagissent avec les

(1) Le *Roentgen* (r) est une ancienne unité qui ne s'applique qu'aux rayons X ou γ. Sa valeur est sensiblement la même que celle du rad. Cependant, elle n'intéresse pas le radiobiologiste car elle ne mesure pas la quantité d'énergie absorbée par les tissus.

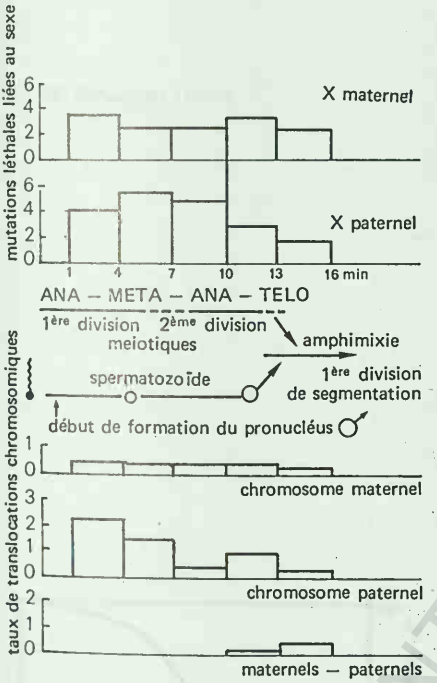


Figure 7.4
Influence des rayons X sur le taux de mutation chez la Drosophile. Des œufs sont irradiés à divers stades des premières phases de leur développement : divisions de maturation et amphimixie. Le maximum de mutations léthales est relevé dans l'ovocyte à l'anaphase de chaque division de maturation. Le noyau du spermatozoïde présente le maximum de sensibilité au début de la formation du pronucleus mâle. Alors que le taux de translocations entre chromosomes maternels reste constant pendant la période considérée, celui des chromosomes paternels atteint une valeur maximale au début de la formation du pronucleus. D'après Würgler, in "Effects of radiations on meiotic systems", A A I Vienne, 8-11 mai 1967, p. 57

CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

bases azotées et altèrent ainsi la structure du codon affecté. Mais l'absorption par voie orale de radionucléides (pollution des aliments) peut aussi conduire à de tels effets. Imaginons que du P^{32}, du tritium ou du C^{14} soient incorporés à une chaîne d'ADN. Dans le cas du radiophosphore, qui constitue un maillon essentiel du squelette polydésoxyribosephosphate, sa transmutation en soufre provoquera la rupture de la chaîne. En ce qui concerne le C^{14} ou le tritium, leur transmutation respective en azote et hélium altèrera irrévocablement la structure des bases puriques ou pyrimidiques. Dans un cas comme dans l'autre, les rayons ou les radioéléments auront produit une mutation chimique puisqu'elle sera causée par une perturbation de la structure moléculaire du codon affecté.

De façon générale, les cellules en mitose sont très sensibles à l'irradiation. Cela explique entre autres la grande vulnérabilité des cellules germinales aux rayons ionisants et l'action stérilisante qui en résulte. Celle-ci peut être partielle ou totale, réversible ou définitive selon la dose reçue.

De nombreuses recherches expérimentales ont permis de mieux évaluer les effets biologiques des radiations ionisantes. Elles ont été réalisées sur des mammifères et bien d'autres espèces animales et végétales. Les enquêtes cliniques effectuées sur des échantillons de population exposés à une forte irradiation ont aussi beaucoup apporté à la connaissance des effets des rayonnements sur l'espèce humaine. Tel est, en particulier, le cas des travaux de la commission américano-japonaise d'étude des victimes des bombes atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki.

Radiosensibilité des êtres vivants aux doses léthales

Les fortes doses de rayonnements provoquent la mort des individus exposés. Si l'on trace la courbe dose-mortalité d'une population expérimentalement soumise à une irradiation, on constate que le graphe obtenu présente une allure de sigmoïde. C'est à partir de ce diagramme que l'on calcule la DL 50, dose théorique en rads ou en rems qui provoque 50 % de mortalité dans la population considérée après un temps déterminé. Par ailleurs, l'étude des variations de la proportion de morts en fonction de la dose montre l'existence d'un seuil au-dessous duquel les individus ne paraissent pas affectés (fig. 7.5). Les doses inférieures à celui-ci sont dites subléthales. Elles ne doivent pas être considérées pour autant comme inoffensives.

L'irradiation expérimentale de nombreuses espèces végétales et animales révèle une très grande variabilité de la DL 50 chez les êtres vivants et l'existence d'énormes écarts de radiosensibilité. Les organismes les plus résitants sont les bactéries, les plus sensibles, les vertébrés à sang chaud.

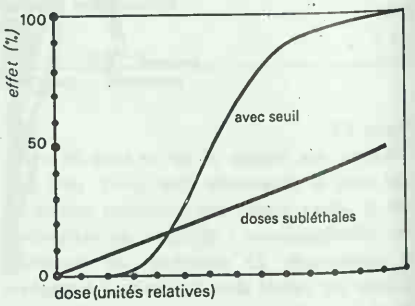


Figure 7.5
Aspect des courbes dose-réponse chez les organismes exposés aux radiations ionisantes. On peut concevoir des courbes linéaires sans seuil ou des courbes sigmoïdes avec seuil. Aucune donnée expérimentale ne permet encore de résoudre ce dilemme et il semble que l'une ou l'autre des hypothèses soit valable selon le type d'effet pathologique considéré. D'après Langham in *Fowler, 1965, p. 17*

CSU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La DL 50 consécutive à une seule exposition est de l'ordre du million de rads chez les bactéries, de quelques centaines de milliers de rads chez les plantes vertes, de l'ordre de 50 000 rads chez les arthropodes et de quelques centaines de rads chez les mammifères.

Il apparaît donc que la radiosensibilité des espèces vivantes est d'autant plus forte que leur degré d'évolution et la complexité de leur organisme est plus grande.

Cependant, à l'intérieur d'un même groupe, certains écarts paraissent difficilement explicables. Ainsi, la DL 50 de la drosophile adulte est de 85 000 rads, à l'opposé, celle de la mouche domestique est de 10 000 rads.

Le scorpion *Vejovis confusus,* les coléoptères ténébrionides *Trogloderus costatus* et *Pellecyphorus pantex,* le bruchide *Acanthoscelides* (1) possèdent une résistance exceptionnelle aux radiations ionisantes, avec une DL 50 de l'ordre de 150 000 rads qui constitue un record dans le règne animal.

(1) Cf. Echaubard (1973).

A l'opposé, les oiseaux et les mammifères présentent une très forte radio-sensibilité. Chez l'homme ont été relevés les effets suivants à la suite d'expositions à de fortes doses de radiations (accidents ou victimes des bombes atomiques):

Tableau LV — Effets sur l'homme d'une irradiation totale (Cook, 1971)

Doses en rems	*Effets après l'exposition*
100 000	Mort dans les minutes qui suivent
10 000	" les heures "
1 000	" les jours "
700	90 % de mortalité dans les semaines qui suivent
200	10 % de mortalité dans les mois qui suivent
100	Aucune mortalité mais augmentation significative des cas de cancers. Stérilité permanente chez la femme, 2 à 3 ans de stérilité chez l'homme.

La lecture du tableau LV montre que le temps s'écoulant entre l'irradiation et l'effet est d'autant plus grand que la dose est plus faible.

On a pu calculer à partir de telles données que la DL 50 après 3 semaines pour l'espèce humaine est de l'ordre de 400 rads.

La radiosensibilité varie aussi selon l'âge des individus exposés. Les animaux jeunes et *a fortiori* les embryons sont beaucoup plus vulnérables que les adultes. On constate que la résistance aux rayonnements croît avec l'âge. On met cette forte sensibilité aux radiations ionisantes des jeunes organismes en corrélation avec

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'intense activité mitotique de leurs tissus. Il est notoire que les mitoses sont nombreuses chez l'embryon ou chez les êtres vivants en croissance active. De même, ce sont les gonades et la moelle osseuse hématopoiétique des vertébrés qui possèdent la plus grande radiosensibilité. Or de tels tissus sont le siège d'actives divisions cellulaires. En revanche, les neurones, qui ne se divisent pas chez l'adulte, figurent parmi les cellules les plus résistantes à l'irradiation.

Effets des doses subléthales

Le tableau LV nous montre aussi que les doses subléthales exercent des effets somatiques et germinaux très importants.

A cet égard, il convient de distinguer en radiobiologie, les effets d'une irradiation brève à de fortes doses de ceux que provoque une exposition prolongée ou permanente à de faibles doses. C'est évidemment à ces derniers que se rapportent les préoccupations du radioécologiste : les risques inhérents à la contamination radioactive de l'environnement découlent de ce type d'irradiation.

L'exposition à des doses subléthales de radiations ionisantes produit les effets suivants :

— elle diminue la vigueur physiologique des individus irradiés (ralentissement de la croissance, atténuation de la résistance aux poisons et de la capacité de défense immunitaire de l'organisme).

— elle affecte les caractères démoécologiques des populations (diminution de la longévité, du coefficient intrinsèque d'accroissement naturel par stérilisation partielle ou totale, etc . . .).

— elle altère le génome de façon différée (induction de mutations défavorables, subléthales, qui se manifestent en seconde ou en troisième génération).

— elle est partiellement cumulative : *il y aurait sommation d'effets irréversibles* (dans certaines limites toutefois).

L'atténuation de vigueur physiologique consécutive à l'irradiation est connue de longue date.

La croissance et la vigueur des végétaux sont très affectées par des doses subléthales (Sparrow et Christensen, 1953). Le tableau LVI met aussi en évidence les grandes différences de sensibilité à une irradiation chronique, d'une espèce à l'autre, chez les phanérogames.

L'exposition aux rayonnements ionisants diminue l'activité de synthèse des acides nucléiques, donc des protéines. C'est ainsi que l'on explique la faiblesse ou l'absence d'élaboration d'anticorps par l'organisme animal irradié. Il en résulte une baisse de la capacité de défense immunitaire, phénomène mis à profit en chirurgie pour éviter les réactions de rejets lors des greffes d'organes. La facilité avec laquelle s'implantent les greffes de moelle osseuse chez les individus accidentellement irradiés découle aussi de ces effets des radiations ionisantes.

CONSTANCE UNIVERSITY LIBRARY

Tableau LVI — Variation dans la radiosensibilité des plantes supérieures d'une exposition chronique aux rayons γ. (D'après Sparrow et Christensen, 1953).

Espèce	*Dose en rads/jour*		*Durée d'exposition (en semaines)*
	Nature de l'effet observé		
	Croissance ralentie	Rabougrissement sévère	
Lilium	20	30	15
Vicia faba	60	90	15
Chenopodium album	250	450	15
Solanum tuberosum	300	600	10
Allium cepa	400	800	18
Brassica oleracaea	1 400	2 500	10
Gladiolus sp.	4 100	6 000	8

Cependant, les conséquences de ces phénomènes sont défavorables. C'est très probablement à de tels mécanismes d'atténuation des réactions immunitaires qu'il faut rapporter la plus grande vulnérabilité des mammifères irradiés aux affections cancéreuses. En effet, celles-ci paraissent dans la plupart des cas, sinon dans tous, d'origine virale.

Nous avons pu montrer dans nos propres recherches que l'irradiation à des doses subléthales atténue la résistance aux insecticides chez *Musca domestica* (Ramade, 1967). Ainsi, chez les femelles issues de pupes âgées irradiées avec des doses croissantes de rayons γ, nous avons trouvé une DL 50 après intoxication au lindane de 0,3 μg par ♀ pour des individus ayant été exposés à 5 000 rads au stade nymphal, 1 μg/♀ pour une exposition de 2 000 rads alors que les insectes témoins présentaient une DL 50 de 2,4 μg/♀ avec ce même insecticide (fig. 7.6).

L'exposition chronique aux radiations ionisantes atténue la longévité des individus, même si elle ne provoque pas de mortalité à court terme. L'étude des courbes de survie de populations appartenant à certaines espèces d'insectes (Fig. 7.7), met bien en évidence ce phénomène. La diminution de l'espérance moyenne de vie est, dans un large domaine, directement proportionnelle à la dose administrée.

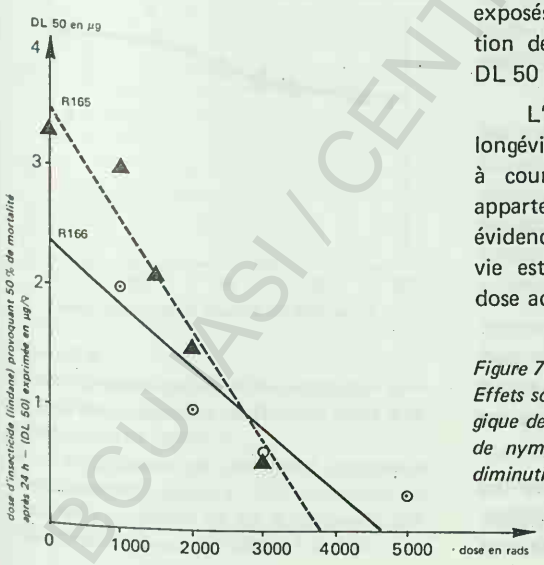


Figure 7.6
Effets somatiques des radiations ionisantes : atténuation de la vigueur physiologique des individus irradiés. Ici, on constate que l'irradiation aux rayons gamma de nymphes de Musca domestica *provoque chez les mouches adultes une diminution de résistance aux insecticides proportionnelle à la dose administrée.*
D'après Ramade, Ann. Inst. Nat. Agron. Paris, T.V, NS, 1967, p. 152.

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

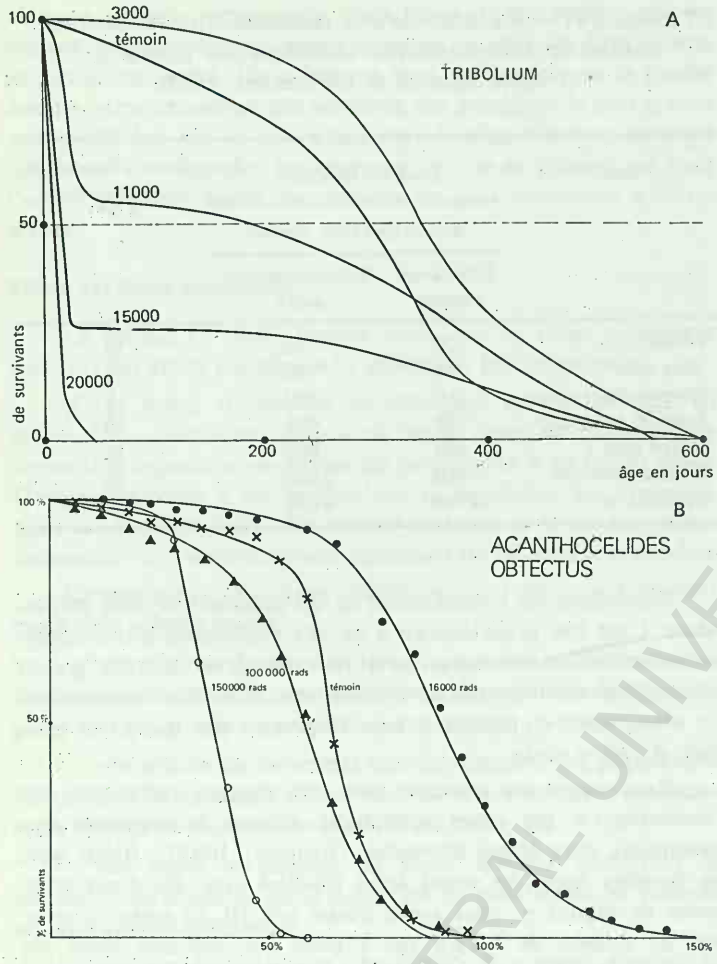


Figure 7.7
*Courbes de survie de deux populations d'insectes adultes (*Tribolium, *A et* Acanthoscelides obtectus, *B), irradiées à l'état nymphal par des doses croissantes de rayons X.*
On constate que les faibles doses accroissent significativement la longévité ! Ce phénomène est interprété comme résultant d'un ralentissement du métabolisme chez les insectes irradiés. Rappelons que les adultes de ces deux espèces de coléoptères vivent sur des réserves accumulées pendant la vie préimaginale (A, d'après Cork, 1957 in *Odum, B, d'après Echaubard, 1973)*

De nombreuses recherches montrent l'existence d'un seuil dans l'action d'une irradiation chronique avec des doses subléthales sur la longévité des invertébrés (fig. 7.8 A).

Les doses subléthales affectent aussi le potentiel biotique des animaux irradiés. L'exposition répétée ou continue à des rayons ionisants provoque une diminution progressive du coefficient intrinsèque d'accroissement naturel (*r*). Marshall (1962) a étudié en détail ce phénomène dans le cas d'une population de *Daphnia pulex* exposée en permanence à de faibles doses de rayons γ (fig. 7.8).

La baisse du potentiel biotique qui en résulte provient non seulement du raccourcissement de la période de ponte causé par la moindre longévité des femelles, mais surtout de l'action stérilisante des radiations sur les gonades des deux sexes.

On relève de grandes variations dans la radiosensibilité des cellules germinales selon l'espèce considérée. Chez les arthropodes, les doses radiostérilisantes sont comprises entre 1 000 et

ROMANIAN CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau LVII — Dose provoquant 100 % de radiostérilisation chez diverses espèces d'arthropodes (DL 100), d'après divers auteurs.

Espèces		*Dose stérilisant 100 % des individus (en rads).*
Icerya purchasi (Cochenille)		1 500
Musca domestica	Diptères	4 000
Callitroga hominivorax	Diptères	5 000
Drosophila melanogaster	Diptères	16 000
Habrobracon sp. (Hyménoptère)		7 500
Anobium punctatum	Coléoptères	8 000
Lyctus sp.	Coléoptères	32 000
Tyroglyphus farinae (Acarien)		50 000
Androctonus sp. (Scorpion)		> 80 000 ?

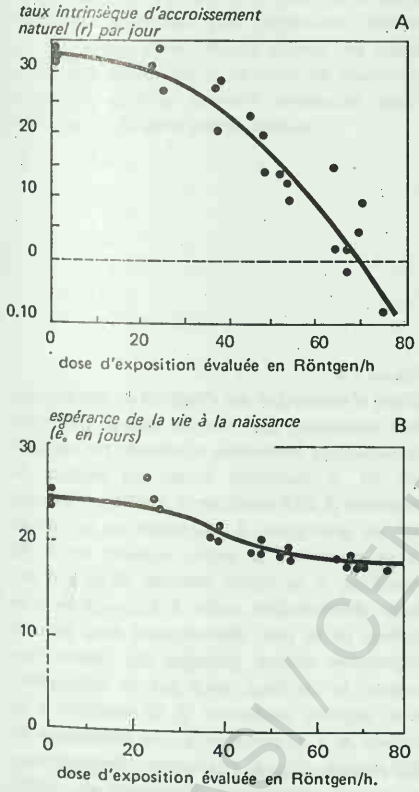


Figure 7.8
Effets démoécologiques d'une irradiation continue d'une population de Daphnia pulex *à de faibles doses de rayons X.*
A — Modification du coefficient intrinsèque d'accroissement naturel r ; B — diminution de l'espérance moyenne de vie, à l'éclosion. D'après Marshall, Ecology, 1962, 43, p. 598

80 000 rads (Tableau LVII). Elles s'élèvent à 96 000 rads chez le nématode *Ditylenchus dipsaci.*

A l'opposé, l'exposition à une centaine de rads est en général suffisante pour stériliser les mammifères. Les femelles paraissent plus sensibles que les mâles. Tel est en particulier le cas de la femme (cf. Tableaux LV et LVII).

Les divers types de perturbations physiologiques évoquées ci-dessus ne semblent se manifester qu'à partir d'une dose critique au-dessous de laquelle aucun effet n'est décelable.

Il n'en est plus de même, en revanche, pour des perturbations somatiques différées comme l'induction de cancer et pour les effets génétiques comme la mutagénèse.

La notion de seuil de nocivité est des plus contestées en ce domaine. Il semble que la courbe dose-réponse (fig. 7,5) soit linéaire dans un large domaine, toute exposition, aussi faible qu'elle soit, étant cumulative.

Ce fait a d'ailleurs été amplement démontré dans le cas des radiations ultraviolettes (Blum, 1959).

En pareil cas, l'hypothèse la plus raisonnable consiste à considérer que toute dose de rayonnement présente un risque de carcinogénèse ou de mutagénèse pour une fraction de la population.

L'existence de mécanismes de restauration qui permettent de réparer des dommages somatiques causés aux cellules tant que la dose est inférieure à un seuil critique ne doit pas faire omettre que l'on ne dispose d'aucun indice sur l'éventualité d'un tel seuil pour les effets carcinogènes et mutagènes. Bien au contraire, plusieurs travaux récents montrent que dans le domaine de la carcinogénèse, l'action des radiations est synergiste d'autres facteurs nocifs, ce qui multiplie les risques d'induction de cancer. Ainsi, sur une population de 26 392 mineurs d'uranium américains fumeurs de tabac, on

29

devrait observer 15,5 cancers du poumon (compte tenu de la fréquence de cette affection aux Etats-Unis), or le nombre de cas réellement recensé s'est élevé à 60 ! (Cook, 1971).

Enfin, le plus grand danger inhérent à l'exposition de l'espèce humaine aux radiations ionisantes réside dans la possibilité d'un effet auto-amplificateur de nature génétique. Il faut prendre en considération que les actions mutagènes sont cumulatives non seulement au niveau de l'individu mais de la descendance : une translocation chromosomique par exemple est transmissible par essence.

Le taux de mutation chez un descendant de parents irradiés sera accru proportionnellement à la dose reçue par le descendant au cours de sa vie.

Dans ces conditions, un accroissement même minime du taux de mutation, qui passera inaperçu pendant les premières générations, pourrait, s'il est maintenu en permanence, conduire à une catastrophe génécologique dans un avenir imprévisible.

C'est dans de telles perspectives que doit se placer la discussion sur les "doses admissibles", si tant est qu'elles existent, établies par la Commission Internationale de Protection Radiobiologique (CIPR).

Les normes adoptées par cet organisme procèdent d'un postulat : on pourrait accepter pour l'ensemble de l'humanité une valeur limite d'exposition aux radiations ionisantes correspondant au double de la dose moyenne à laquelle l'homme se trouve exposé dans les conditions naturelles. (Fig. 7.9).

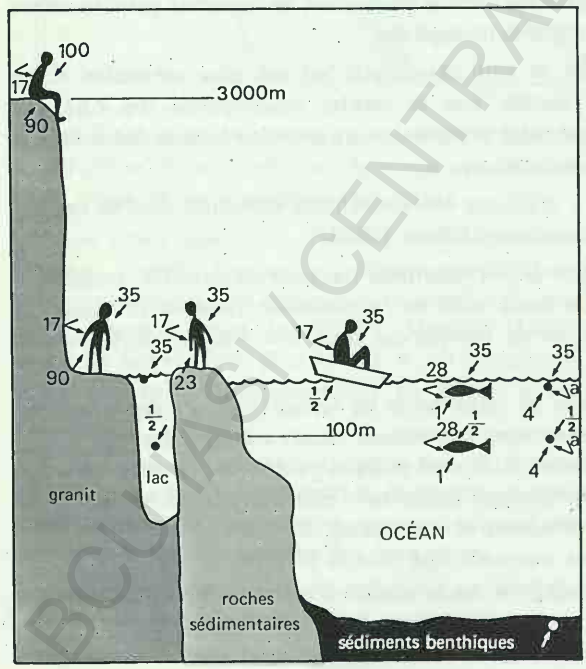


Figure 7.9
Doses d'exposition de l'homme et des organismes aquatiques aux diverses sources naturelles de radiations ionisantes, exprimées en millirads par an. L'irradiation totale est évaluée en moyenne à 207 mrads/an à 3 000 m d'altitude sur sol granitique, à 142 mrads/an au niveau de la mer avec ce même substrat et à 75 mrads/an, à la même altitude (0 m) sur terrains sédimentaires, enfin à 52 mrads/an à la surface de la mer. Remarquons aussi que les organismes marins, protégés des rayons cosmiques et de ceux émis par la lithosphère, sont exposés seulement à 64 mrads/an à la surface et à 30 mrads/an à une profondeur de 100 mètres. D'après Polikarpov "Radioecology of aquatic organisms", Rheinhold ed., 1966, p. 210

- rayons cosmiques
- irradiation des émetteurs α incorporés
- irradiation des sources locales externes
- exposition aux radiations émises par le ^{40}K des tissus

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

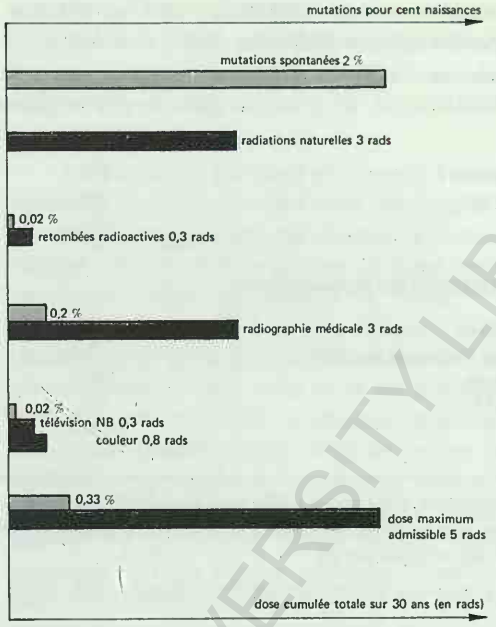


Figure 7.10
Doses d'exposition moyenne d'un habitant des Etats-Unis aux principales sources naturelles et technologiques de rayons ionisants. Les barres horizontales noires figurent la quantité totale de radiations absorbées par l'organisme humain en trente ans pour chaque source, les barres hachurées représentent les taux de mutations respectifs qu'elles peuvent provoquer exprimées en %. D'après divers auteurs

Cela présuppose que notre espèce est parfaitement adaptée à la radioactivité présente dans son environnement. Cette hypothèse est fondée sur la présence de groupes humains qui habitent dans des territoires au sol cristallin, très radioactif, et sont de ce fait exposés à des doses de rayonnement bien supérieures à celles reçues par les habitants de la majorité des pays industrialisés. N'a-t-on pas pu calculer qu'une tribu d'aborigènes du Brésil recevait en moyenne 1 600 millirems par an, soit dix à vingt fois plus que l'exposition habituelle aux radiations de l'ensemble de l'humanité ?

Rien n'est moins certain que l'inocuité de telles conditions radiobiologiques réputées normales. En ce qui concerne les effets mutagènes, personne ne conteste aujourd'hui que la seule dose sans effet est la dose zéro.

Si nous examinons maintenant les diverses sources de rayons ionisants auxquels l'homme moderne est exposé, nous constatons qu'elles tendent à se diversifier (Tableau LVIII).

L'examen des données de ce tableau ainsi que de celles réunies dans la fig. 7.10, fait apparaître le rôle prépondérant de la radiologie médicale et dans une moindre mesure celui de la télévision (1) comme cause principale d'irradiation des habitants des pays industrialisés. On peut d'ailleurs s'interroger sur le discernement avec lequel sont parfois prescrits les examens radiologiques et sur l'utilité des campagnes dites de dépistage systématique en particulier pour les enfants et les adolescents. L'évolution actuelle montre que le corps médical tend à réduire les examens radiographiques de routine et à recourir à un usage plus fréquent de techniques qui permettent de diminuer le taux d'irradiation des patients.

(1) Le bureau U.S. de radioprotection a mis en garde en 1969 les téléspectateurs contre les risques d'irradiation excessive inhérents à l'emploi de téléviseurs. Ce bureau a recommandé de ne jamais se tenir au niveau ou en arrière du tube cathodique et de ne jamais regarder l'écran à une distance inférieure à 2 mètres.

BOLASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau LVIII – Principales sources d'exposition de l'homme aux radiations ionisantes (d'après Mellanby, 1967, modifié)

A – SOURCES NATURELLES	Dose annuelle en millirads
Rayons cosmiques	25
Radioactivité des roches	50
Radioactivité du corps	25
Total ...	100
B – SOURCES TECHNOLOGIQUES (Royaume-Uni)	
Retombées radioactives	1,3
Rejets de déchets par l'industrie nucléaire	1,8
Radiographie médicale	100
Ecrans de télévision**	10
Total* ...	113

* La dose maximale admissible fixée par la CIPR pour l'ensemble de la population, en addition des sources naturelles et des examens radiologiques à des fins médicales est de 166 millirads par an.

** Pour un sujet situé à 2 mètres de l'écran d'un récepteur (d'après Cook, 1971).

A l'opposé, les expérimentations d'engins nucléaires dans l'atmosphère et l'utilisation pacifique de l'atome ne paraissent pas avoir été jusqu'à présent une source d'irradiation significative pour l'ensemble de l'espèce humaine. Toutefois, les habitants de régions situées à proximité des polygones de tirs, ou des zones de haute densité de retombées, certains groupes ethniques aux régimes alimentaires spéciaux (lapons, consommateurs d'algues dans des estuaires pollués), ont reçu des doses de rayonnements de valeur nettement supérieure à celles données dans le tableau précédent.

Mellanby (1967) n'hésite pas à écrire que *"les plus grands dommages causés à l'environnement en Grande-Bretagne par le développement de l'énergie nucléaire ... résident en la construction de centrales dans des régions reculées, auparavant habitat de nombreuses espèces animales qui ont été détruites ... mais pas par les radiations"*.

Si de tels propos paraissent jusqu'à présent justifiés pour l'ensemble de l'Europe occidentale, rien n'autorise néanmoins un relâchement de vigilance en ce domaine ainsi qu'en atteste l'étude des effets différés de nature somatique ou génétique.

Une vive controverse oppose depuis quelques années les tenants d'un développement accéléré voire intempestif de l'énergie nucléaire et de nombreux biologistes. Cette polémique porte sur l'ampleur des effets nocifs induits par les faibles doses d'irradiation d'origine technologique sur la santé des habitants des pays industrialisés.

Aux Etats-Unis, l'émotion soulevée dans l'opinion publique par la multiplication des projets d'utilisation pacifique de l'énergie atomique et par la contamination radioactive qui en résulterait a

BOWLING GREEN UNIVERSITY LIBRARY

conduit en 1971 le Federal Radiation Council à demander que l'Académie nationale des Sciences fasse un rapport sur ce sujet. Celui-ci vient d'être publié sous le titre suivant : *"Effets sur les populations de l'exposition à de faibles doses de radiations ionisantes*(1972)".

Un terme est mis dans ce rapport à bien des controverses, en particulier à celles sur les "doses admissibles" de radiations. Tous les experts conviennent que chaque exposition présente des effets néfastes et l'on doit substituer à cette notion celle de "risque admissible". Mais qui accepte le risque ? Certainement pas le citoyen qui n'a pas voix au chapitre en l'occurence. Dans le domaine de la pollution de l'environnement par les radionucléides, comme d'ailleurs dans celui de la contamination chimique (par les pesticides par exemple), la décision revient à des experts, dont le rôle est de faire la balance entre les risques possibles pour la santé humaine et les bénéfices attendus de telle ou telle technologie. La prise du risque (pour autrui) est donc le fait d'autorités administratives qui se fondent sur des critères techniques, économiques, politiques et à la rigueur — il faut l'espérer — éthiques. On doit bien convenir dans de telles conditions que des décisions dont les conséquences lointaines pourraient être capitales sont le fait de structures dont le contrôle démocratique est virtuel si l'on songe à la multiplicité des problèmes nouveaux qui surgissent et dont seuls les experts sont avertis ([1]).

(1) Comme l'écrit à juste titre Lebreton (1973), *"ce refus de considérer l'opinion publique comme adulte... est caractéristique de notre type de société économique ; il implique de la part de ses tenants un certain mépris d'autrui qui constitue bien l'une des tares pouvant être reprochées à l'esprit technocratique".*

Dans le domaine des dangers inhérents au développement de l'énergie nucléaire subsiste une discussion sur les questions fondamentales suivantes :

1) Quel est l'aspect de la courbe dose-réponse aux faibles niveaux d'irradiation ?

2) Les faibles doses sont-elles cumulables à 100 % ou seulement de façon partielle ?

3) Quel est le coefficient de risque pour les faibles doses, c'est-à-dire quel est le nombre d'affections cancéreuses et de malformations congénitales que l'on doit attendre chaque année de l'irradiation de l'ensemble de la population au niveau accepté comme "risque admissible" par les autorités administratives ?

Diverses recherches suggèrent que la courbe dose-réponse correspond à une distribution normale. Elle s'ajuste donc selon une sigmoide et peut ainsi être assimilée pour les faibles doses à une droite puisque la pente varie peu pour ces valeurs de la variable (fig. 7.5). Il y aurait alors, en première approximation, proportionnalité entre dose et effet (cf. par exemple Blum, 1959).

Par ailleurs, le taux instantané, c'est-à-dire le débit des rayons ionisants administrés, conditionne la gravité des effets induits. L'effet cumulatif ne serait alors pas absolu et il serait moins dangereux d'être exposé à plusieurs doses fractionnées que de recevoir en une seule exposition une quantité équivalente de radiations.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'existence de phénomènes de restauration qui permettent à une chaîne d'ADN détériorée par les radiations de se reconstituer par copie conforme permet d'espérer une moindre nocivité des faibles taux d'irradiation. On a d'ailleurs pu montrer que la fréquence des mutations dans les spermatogonies et les ovocytes de souris était dépendante, à dose égale, du débit des rayons administrée (Russel dans Langham, 1965). De même, on a pu calculer que la quantité totale de rayons ionisants reçus par le poignet de toute personne portant une montre-bracelet aux aiguilles luminescentes s'élève à 500 rads, valeur supérieure à la DL 50 pour l'homme malgré la faiblesse du taux instantané d'irradiation, si on l'intégre sur toute la vie de celle-ci. Or, on ne connaît aucun cas d'ostéosarcome provoqué par cette source de rayonnements.

La controverse subsiste toujours, également, sur la valeur du coefficient de risque, c'est-à-dire sur l'ampleur des conséquences de l'irradiation aux "doses tolérables". Celui-ci est extrapolé à partir de données fournies par l'étude d'échantillons de populations soumis à de fortes irradiations : survivants des bombes d'Hiroshima et de Nagasaki, victimes d'accidents dans des centres nucléaires, radiologues, personnes ayant subi des radiothérapies excessives, etc . . .

Le tableau LIX figure les valeurs de ces coefficents exprimés en nombre de cas prévisibles par millions de personnes et par rad.

Tableau LIX — Coefficients de risque pour une population humaine irradiée à de fortes doses à la suite d'un accident survenu dans l'industrie nucléaire, (d'après Dolphin et Marley, 1969).

Effets pathologiques	*Population ayant servi de base au calcul*	*Coefficient de risque : nombre de cas provoqués par 10^6 personnes et par an*	
		Estimé statistiquement	*Retenu pour le calcul de risque admissible*
Leucémies	Japonais survivants.	40	20
	Trait. d'ankylose spondylique.	10	
Cancer thyroïde	Enfants irradiés aux rayons X.	10	10
	Adultes irradiés aux rayons X.	3	3
	Absorbtion d'I^{131} :		
	Enfants.	—	3
	Adultes.	—	1
Ensemble des néoplasmes malins	Irradiation médicale	4 fois le risque de L.	
	Japonais survivants	3 fois le risque de leucémies.	80
	Radiologues américains	4 fois le risque de leucémies.	

BOULDER / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Si nul se songe à mettre en doute les statistiques précédentes, l'extrapolation de ces données aux effets des faibles doses de radiations ionisantes donne en revanche lieu à des interprétations divergentes. Celles-ci varient selon le rapport adopté entre le nombre de leucémies et autres néoplasmes induits par ces bas niveaux d'irradiation, selon la durée du temps présumé de latence et celle du plateau, c'est-à-dire de la période pendant laquelle ces effets se manifestent. Dans un cas cependant, celui de la leucémie myéloïde, le rôle des faibles doses de radiations dans l'induction d'un cancer a été démontrée de façon irréfutable. Celles-ci engendrent des effets cumulatifs à 100 % avec une courbe dose-réponse d'aspect quasi linéaire. Le nombre de cas induits s'élève à 3 par million de personnes et par an pour une exposition à 1 rem.

Mais en revanche, d'énormes écarts subsistent selon les auteurs dans l'estimation de l'ensemble des effets carcinogènes. Ainsi, le nombre total de néoplasmes induits par le "maximum tolérable" d'irradiation provoquée par les diverses sources technologiques, fixé à 170 mrem/an par la CIRP, est estimé à 160 cas par an pour l'ensemble de la population américaine par Storer (1969) et à 100 000 cas par an par Gofman et Tamplin (1970). Le récent rapport de l'Académie nationale des Sciences de New York admet 30 000 cas par an et par rem (Tableau LX).

Tableau LX — Variations dans l'estimation des effets pathologiques des faibles doses d'irradiation pour l'ensemble de la population américaine (*in* J. Legault-Demare (1973) mais modifié)

Source	*Durée de latence selon le mode de l'administrat.*	*Plateau*	*Cancers induits en pourcentage du taux "spontané"*	*Cancers induits pour la population américaine chaque année*
Storer (1969)			0,05 %	160
Gofman et Tamplin (1970)	H) pessimiste			
	in utero 5 ans	sans fin	34,3 %	100 000
	autrem. 10 ans	sans fin	34,3 %	100 000
(irradiation 0,17 rem/an)	H) optimiste			
	in utero 5 ans	20 ans	3,1 %	9 000
	autrement 10 ans		3,9 %	9 000
Rapport de l'Académie nationale des Sciences (1972) 0,1 rem/an	*in utero* 0 an	10 ans	1 %	3 000
	autrement 2 à 3 ans	10-15 ans	1 %	3 000

En conclusion, l'étude des récentes données épidémiologiques sur les effets des faibles doses de radiations ionisantes montre l'absence de seuil dans l'induction de manifestations pathologiques. Ces travaux révèlent aussi que l'utilisation pacifique de l'atome, si

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

elle s'accompagne d'une contamination légalement acceptée de l'environnement, se traduira dans les limites du "risque admissible", ainsi défini, par une hausse de quelques pour cent du nombre de cancers et sans doute de mutations induites par rapport au taux "spontané".

En réalité, le plus grave aspect de cette question tient en ce que la contamination radioactive ne peut que s'aggraver — à moins d'adopter des normes plus sévères — avec le développement prévu de l'électronucléaire et de l'utilisation des bombes atomiques à des fins de génie civil. La commission fédérale américaine du gaz naturel a envisagé de faire exploser des milliers de ces engins dans le sous-sol afin d'accroître substantiellement les disponibilités en gaz. Faut-il rappeler que dans une explosion souterraine, 10 % des résidus radioactifs, gazeux, passent dans l'atmosphère, sans omettre l'éventualité d'une contamination des nappes phréatiques ?

L'incorporation de quantités incontrôlées de résidus aux chaînes trophiques terrestres ou océaniques pourrait bien alors conduire vers une situation catastrophique pour notre espèce. C'est cette question des effets radioécologiques des pollutions dont il nous faut maintenant traiter.

CONSEQUENCES ECOLOGIQUES DES RETOMBEES RADIOACTIVES

En 1962, année de la signature du traité d'interdiction des essais nucléaires dans l'atmosphère, les produits de fission de quelque 170 mégatonnes avaient déjà été libérés dans l'air, soit l'équivalent de quelque 8500 bombes de type Hiroshima (Langham, 1965). Depuis sont venues s'y adjoindre les quantités produites par les essais français et chinois, faibles il est vrai, et aussi les dégagements gazeux engendrés par les essais souterrains, lesquels ne sont pas négligeables.

Par ailleurs, les centrales nucléaires rejettent dans l'air divers gaz radioactifs. Toutefois, ne doivent être pris en considération dans ces sources de pollution nucléaire que les radioéléments solides, les seuls susceptibles de donner des retombées.

Pendant la période d'essais d'armements nucléaires 1954-1962, 9 mégacuries de Sr^{90} et 14 mégacuries de Cs^{137} furent libérées dans l'atmosphère (Langham, 1965).

Distribués uniformément à la surface de la terre, les niveaux de contamination qui en résulteraient seraient de 24 millicuries de Sr^{90} et 39 millicuries de Cs^{137} par km^2. Mais en réalité, ces chiffres sont trompeurs. En effet, les résidus radioactifs se déposent de façon très irrégulière à la surface des continents et des océans. Environ 30 % de la quantité totale produite retombent au voisinage immédiat du lieu de l'explosion. Le reste est introduit dans

UNIVERSITY LIBRARY

la troposphère et même dans la stratosphère et ne retournera que très progressivement à la surface du sol. L'expérience a montré que les résidus sont entrainés par la circulation atmosphérique globale et vont contaminer des régions fort éloignées du lieu de l'essai. Les retombées sont maximales dans les zones comprises entre les 40 et 50e degré de latitude nord (cf. fig. 3.5 p. 181). Ainsi, en certaines zones de la communauté européenne, les retombées ont atteint en 1963 quelque deux curies/km^2, c'est-à-dire une valeur plusieurs dizaines de fois supérieure à celle que le calcul laissait prévoir à partir d'une répartition uniforme dans l'ensemble de la biosphère !

Les précipitations ramènent à la surface du globe les déchets radioactifs dispersés dans l'atmosphère. Ces derniers vont ainsi pénétrer dans les sols, les eaux, puis être incorporés à la biomasse.

En milieu terrestre, de nombreuses recherches ont mis en évidence le haut pouvoir de rétention des sols pour deux radionucléides de grande importance biologique, le strontium^{90} et le cesium^{137} . Les sols acides, plus particulièrement, peuvent fixer d'importantes quantités de Sr^{90}.

Le complexe argilo-humique, constitué par de la matière organique en décomposition mélangée à des particules colloïdales argileuses (montmorillonite, par exemple) est capable d'adsorber fortement le Sr^{90} dilué dans les eaux d'infiltration. La plupart des sols neutres peuvent de la sorte retenir 0,5 millicurie de Sr^{90} par gramme à partir d'une solution titrant moins de 40 μg/l de strontium (Guenelon, 1970). Bien souvent, la fixation de cet élément dans le sol est quasi complète et peut donner lieu à des phénomènes d'accumulation.

Il intervient dans tous ces phénomènes un coefficient de sélectivité du sol (K_s) vis-à-vis de tel ou tel radionucléide par rapport à un autre élément important pour les êtres vivants et de propriétés chimiques voisines. On doit faire intervenir un coefficient de rétention dans un sol de chacun des éléments considérés (K_a).

Dans le cas de strontium et de son analogue le calcium, nous aurons la relation $K_s = \frac{K_a\,(Sr)}{K_a\,(Ca)}$.

Ce coefficient K_s varie pour le Sr^{90} de 0,6 à 1,5 selon le sol considéré.

On remarque aussi une sélectivité plus forte de la matière organique pour le calcium, au contraire, le strontium est mieux retenu que le calcium par les colloïdes minéraux.

Ces derniers présentent un pouvoir de rétention encore plus élevé pour le césium. En théorie, un gramme d'argile est capable d'adsorber 6,3 curies de Cs^{137} (Guenelon, 1970) !

Ces colloïdes minéraux du complexe argilo-humique fixent le césium à un tel degré qu'il peut en résulter une redoutable contamination des sols même à partir des eaux pluviales ou d'irrigation à très bas niveau de pollution.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

A l'opposé, le strontium est plus mobile dans les sols de sorte qu'un lessivage intense des terres contaminées pourrait conduire à une pollution des nappes phréatiques par ce radionucléide.

La forte rétention de ces radioéléments par les colloïdes des sols les rend en grande partie indisponibles pour les végétaux. Une fraction des retombées radio-actives passe cependant dans les tissus des plantes et s'incorpore de la sorte aux chaînes trophiques.

La translocation du Sr^{90} dans les végétaux cultivés est plus importante sur sols pauvres en matières organiques que dans des terres riches en humus. La contamination de racines de betteraves par ce radioélément est six fois plus forte sur un sol titrant 2,1 % de matières organiques que celle des mêmes organes dans un sol qui en renferme 10,9 % (Adams et coll., 1965).

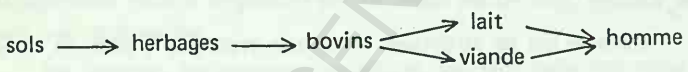
Il existe aussi de grandes différences spécifiques : des radis accumulent dans leur feuillage jusqu'à 60 fois plus de Sr^{90} que des betteraves cultivées sur le même sol, selon ces derniers auteurs.

Malgré le rôle important de la translocation radiculaire dans la pollution des végétaux par les retombées radioactives, la pénétration transfoliaire intervient aussi de façon significative (fig. 7.11). Une proportion importante de strontium ou de césium déposée sur le feuillage de divers végétaux se retrouve rapidement dans les fruits et les graines (Bukovac et coll., 1965).

Les essais de bombes atomiques ou thermonucléaires ont provoqué rapidement une contamination systématique des chaînes trophiques dans les écosystèmes continentaux et océaniques.

L'alimentation humaine est polluée à des degrés divers, et de façon particulièrement sensible dans le cas des produits de l'élevage, par suite du passage du Sr^{90} et de l'I^{131} dans le lait et de celui du Cs^{137} dans les laitages et la viande.

La chaîne trophique :



s'est avérée très vulnérable à la pollution par les retombées radioactives.

On est d'ailleurs surpris de la vitesse à laquelle un radioélément à brève période comme l'I^{131} peut être incorporé dans les produits de l'élevage. Bergström et Gyllander (1969) ont étudié ce passage de la radio-iode dans les plantes fourragères puis le lait des vaches paissant dans des pâturages situés aux alentours du centre de recherches nucléaires de Studsvick, en Suède, où avait eu lieu une fuite de cet élément à la suite de la défaillance d'un filtre.

Ces auteurs ont relevé dans les jours qui suivirent l'accident une élévation rapide du taux d'I^{131} dans le lait des vaches qui se nourrissaient dans les prairies voisines du centre de recherches.

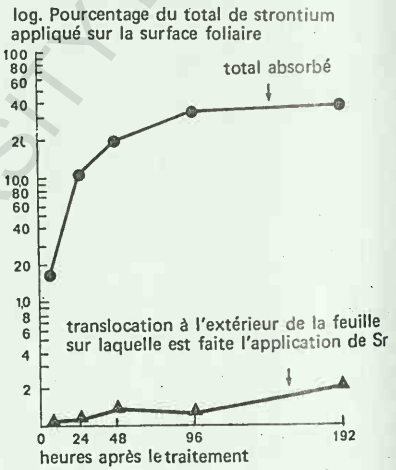


Figure 7.11
Taux d'absorbtion foliaire de strontium après dépôt d'une goutte de ce dernier à la surface de feuilles de haricot. Il se produit une translocation de cet élément non seulement dans le parenchyme foliaire mais dans l'ensemble du végétal. D'après Bukovac et coll. in *Fowler "Radioactive fallout", Elsevier 1965, p. 86*

POLYTECHNIC UNIVERSITY/CENTRAL LIBRARY

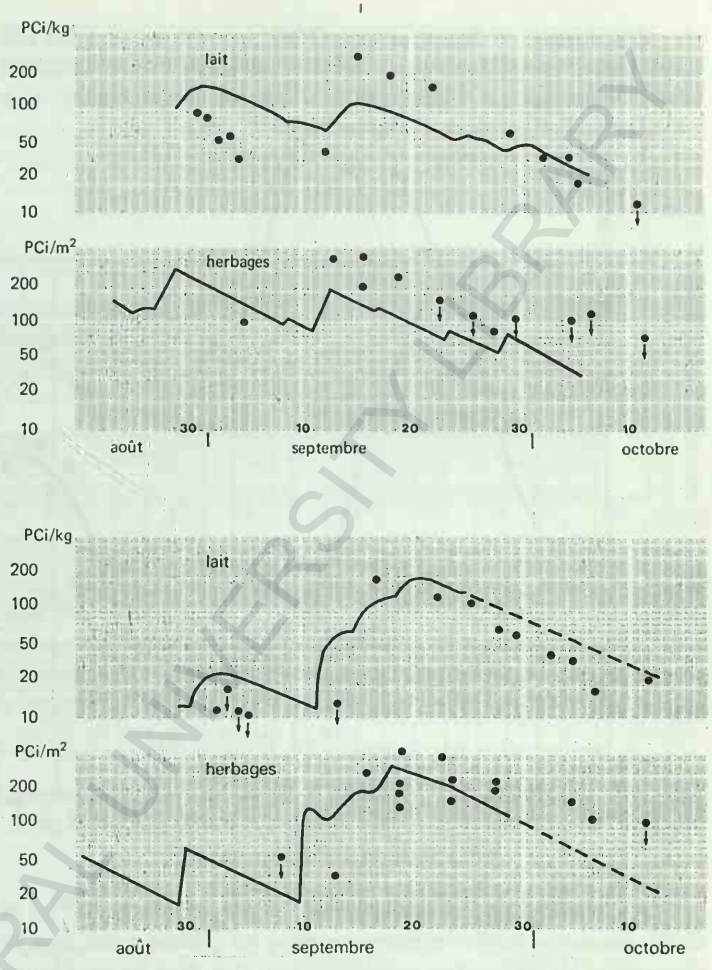


Figure 7.12
Passage de l'Iode 131 dans les plantes d'un herbage puis dans le lait à la suite d'une contamination accidentelle de l'atmosphère à proximité d'un centre de recherches nucléaires en Suède. D'après Bergström et Gyllander in *"Environmental contamination by radioactive material", Agence Intern. Energ. Atom. Vienne ed., 1969, p. 411*

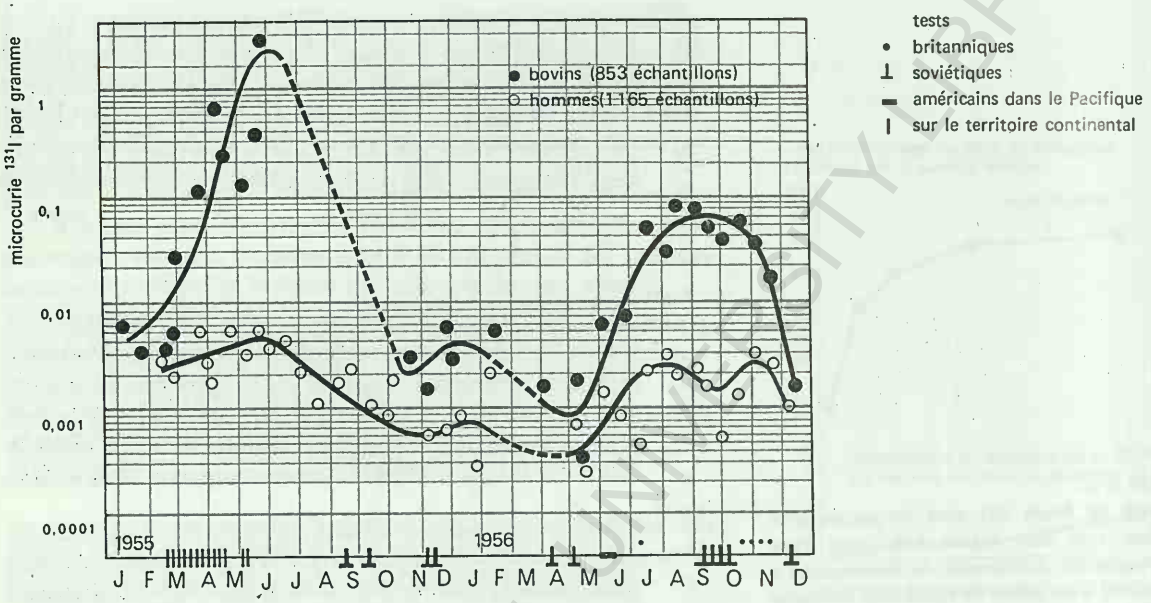
Celui-ci atteignit 300 pCi par kg de lait et 5600 pCi par m^2 de pâturage. Bergström et Gyllander mettent en évidence l'absolue coïncidence des courbes qui donnent la variation du taux d'I^{131} dans les plantes fourragères et dans le lait en fonction du temps. Ce fait traduit la grande vitesse à laquelle ce radioélément est incorporé dans l'organisme animal (fig. 7.12). Enfin, ces auteurs montrent que le taux d'absorption est élevé. Ils relèvent dans le lait une concentration en radio-iode de 0,2 à 0,5 fois celle observée sur les végétaux selon la prairie où a été réalisé le prélèvement.

L'iode radioactif produit par les retombées nucléaires constitue un très dangereux contaminant car il est concentré électivement par les cellules endocrines thyroïdiennes grâce à un très efficace mécanisme de transport actif.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Les travaux de Comar et coll. (1957) ont mis en évidence une remarquable corrélation entre l'intensité des essais thermonucléaires dans l'atmosphère en 1955-56 et le niveau de contamination de la thyroïde des bovins et de l'homme par l'I^{131} (fig. 7.13).

Figure 7.13
Corrélation entre les expériences thermonucléaires dans l'atmosphère et la contamination de la thyroïde des bovins et de l'homme par l'Iode 131. D'après Comar et coll. Science, 1957, 126, p. 17



Des radioéléments à période assez longue comme le Sr^{90} ou le Cs^{137} peuvent *a fortiori* s'incorporer dans les chaînes trophiques et s'accumuler en dernier lieu respectivement, l'un dans les os, l'autres dans les muscles des vertébrés à sang chaud, homme inclus.

Il apparaît que les jeunes individus ont un potentiel de rétention pour le Sr^{90} nettement supérieur à celui des adultes (fig. 7.14), ils sont donc plus exposés que l'ensemble de la population à la pollution des aliments par les radionucléides.

La figure 7.3 montre le cheminement et le niveau d'accumulation du Sr^{90} et du Cs^{137} dans les chaînes alimentaires d'un être humain. On admet que l'individu et son environnement écologique sont en équilibre avec le sol dans ces schémas.

On constate que la circulation du Sr^{90} du sol au lait, puis du lait au système osseux s'effectue avec un rendement de 7.6 %. Cela signifie que la concentration du radiostrontium par rapport au calcium incorporé aux ostéocytes est 0,076 fois celle de cet élément par rapport au calcium disponible du sol (fig. 7.3 a). De même, la concentration du Cs^{137} par rapport au potassium du muscle est égale à 3 % de celle de cet élément par rapport au potassium disponible du sol (fig. 7.3 b).

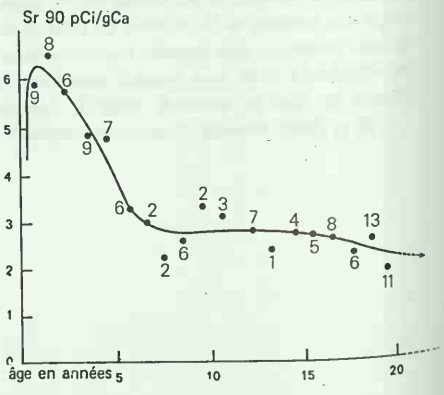


Figure 7.14
Concentration du ^{90}Sr (en pCi/g Ca) dans le squelette humain en fonction de l'âge en 1966. Les chiffres indiquent le nombre d'échantillons analysés. D'après Loutit in *"Environmental contamination by radioactive materials", Vienne AIEA ed. 1969, p. 27*

SCIENTIFIC CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

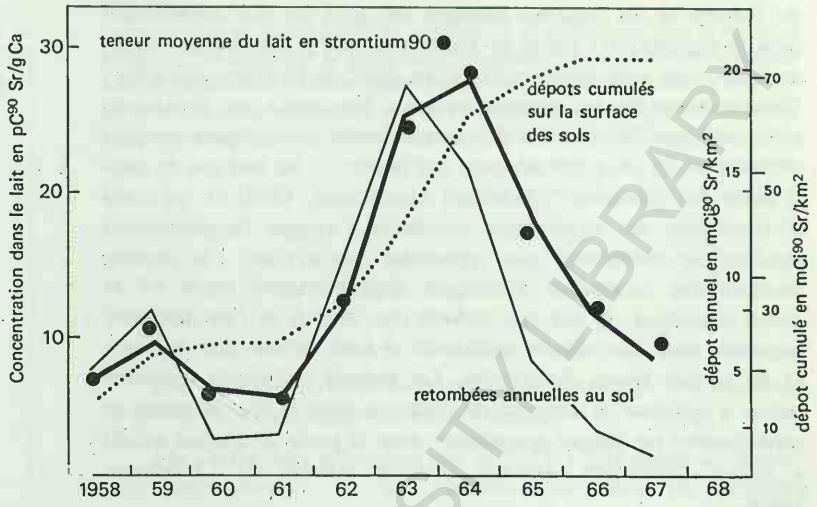


Figure 7.15
Contamination du sol et du lait par les retombées de radio-strontium en Grande-Bretagne entre 1958 et 1968. D'après Russel et Bruce in *"Environmental Contamination by radioactive materials" AIEA Vienne, 1969, p. 6.*

Les figures 7.13 et 7.15 montrent que les essais nucléaires dans l'atmosphère ont provoqué une contamination très significative de l'alimentation humaine par ces divers radionucléides. Non seulement le lait, mais l'ensemble des produits d'origine tant animale que végétale sont pollués par les retombées radio-actives ainsi qu'en atteste le tableau LXI.

Tableau LXI — Contamination radioactive des repas et du lait servis dans les cantines scolaires de deux départements français, d'après Gahinet et coll, 1969.

Origine	*Nature du prélèvement*	*Strontium*^{90}			
		PCi/j (1) PCi/l (2)	PCi/g Ca	PCi/j (1) PCi/l (2)	PCi/g K
Dépt du Puy de Dôme	Repas (1)	25	27	49	15
	Lait (2)	28	22	63	42
Dépt de l'Isère	Repas (1)	22	22	30	9,3
	Lait (2)	13	10	25	16

Les données de Gahinet et coll (1969) révèlent une contamination systématique, bien que faible, de l'ensemble de l'alimentation dans notre pays.

L'existence d'effets nocifs pour la santé humaine provoqués par les résidus provenant des retombées nucléaires a donné lieu à bien des controverses. Toutefois, la mise en évidence d'une action cumulative pour les effets mutagènes et carcinogènes, l'importance relative des taux de Sr^{90} dans le système osseux des enfants (fig. 7.14) par rapport à celui des adultes, enfin la découverte de nodules thyroïdiens de caractère douteux chez un certain nombre d'enfants vivant à quelques centaines de km des polygones de tirs

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

du Nevada et du Nouveau-Mexique ont joué un rôle déterminant dans la signature du traité de Moscou de 1963. Commoner (1966) compare, non sans quelque ironie, les deux déclarations suivantes : *"le maintien de la cadence actuelle des essais de bombes A, effectués sous le contrôle des personnalités scientifiques les plus sérieuses et les plus compétentes qui soient . . . ne met pas en péril la santé de l'humanité"* (Président Eisenhower, 1956) et *"ce traité d'interdiction des expériences nucléaires a stoppé l'augmentation régulière et menaçante des retombées radioactives. Les mortels produits des explosions atomiques empoisonnaient notre sol et notre nourriture, le lait que boivent nos enfants et l'air que nous respirons tous. Des dépôts radioactifs se sont formés dans les dents et les os des jeunes Américains. Les poisons radioactifs commençaient à menacer la sécurité de l'homme dans le monde entier et constituaient un danger grandissant pour la santé de chaque enfant à naître"* (Président Johnson, discours télévisé du 17 octobre 1964).

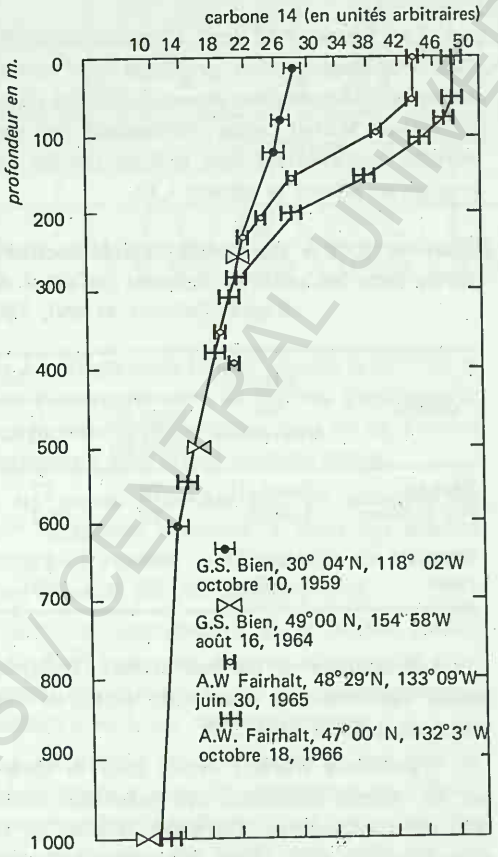


Figure 7.16
Concentration du Carbone 14 (en Unités arbitraires) en fonction de la profondeur dans le Pacifique Nord-Est. D'après Pritchard, Reid et coll. "Radioactivity in the marine environment", National Acad. Sciences, Washington DC 20418, 1971, p. 127

U IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

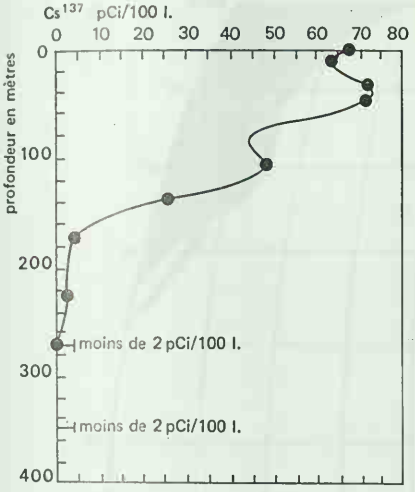


Figure 7.17
Concentration du Césium 137 en fonction de la profondeur dans le Pacifique Nord-Est. On remarque la décroissance progressive du taux de contamination avec la profondeur — comme pour le radiocarbone — conséquence du mode de pollution du milieu océanique, lié aux retombées à la surface des radionucléïdes libérés dans l'atmosphère. D'après Pritchard, Reid et coll., 1971, p. 126

Les retombées radioactives ont aussi provoqué une contamination des couches superficielles de l'océan.

Les recherches effectuées sur le C^{14} (1) ont révélé un important accroissement de sa concentration dans les premiers 300 mètres au-dessous de la surface (fig. 7.16). Il est assez évident d'après l'étude du profil des courbes de concentration verticale en 1959, 1965 et 1966 que les quantités de cet élément apportées par les bombes excèdent de beaucoup le flux naturel du radiocarbone. On remarque le même gradient vertical pour le césium ^{137} (fig. 7.17).

Par ailleurs, il est remarquable de noter la décroissance du Sr^{90} présent dans les eaux de l'Atlantique Nord depuis la signature du traité d'interdiction des essais nucléaires dans l'atmosphère.

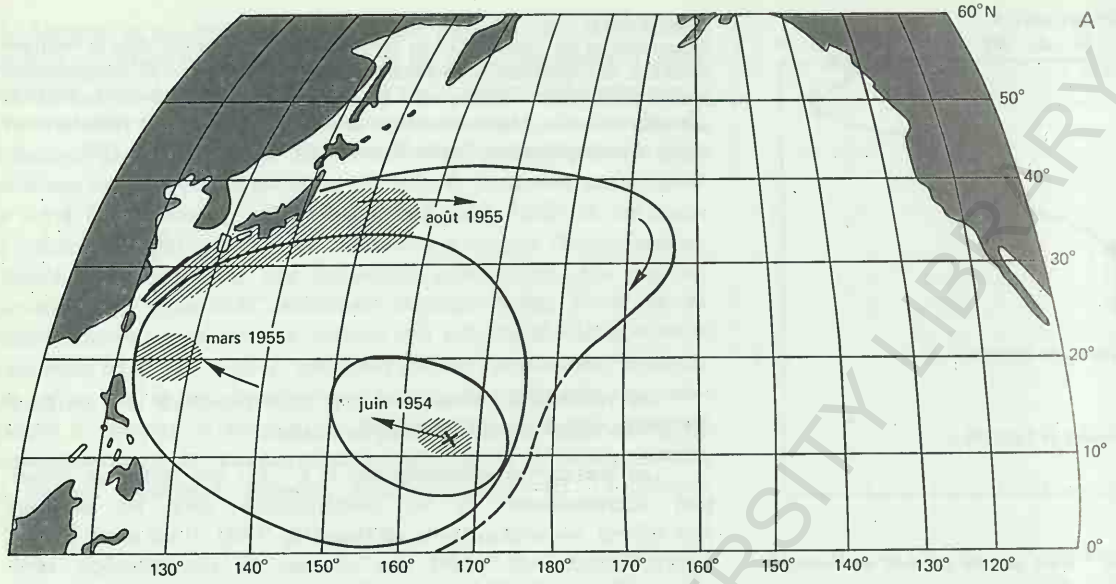
Un fait intéressant mérite d'être signalé. Broecker et coll. (1966) ont constaté que des échantillons d'eaux abyssales de l'Atlantique, prélevées à 4330 m de profondeur, renfermaient des concentrations anormalement élevées de Sr^{90} et de Cs^{137}. La circulation verticale des eaux dans cet océan est donc beaucoup plus rapide que l'on ne l'avait initialement pensé.

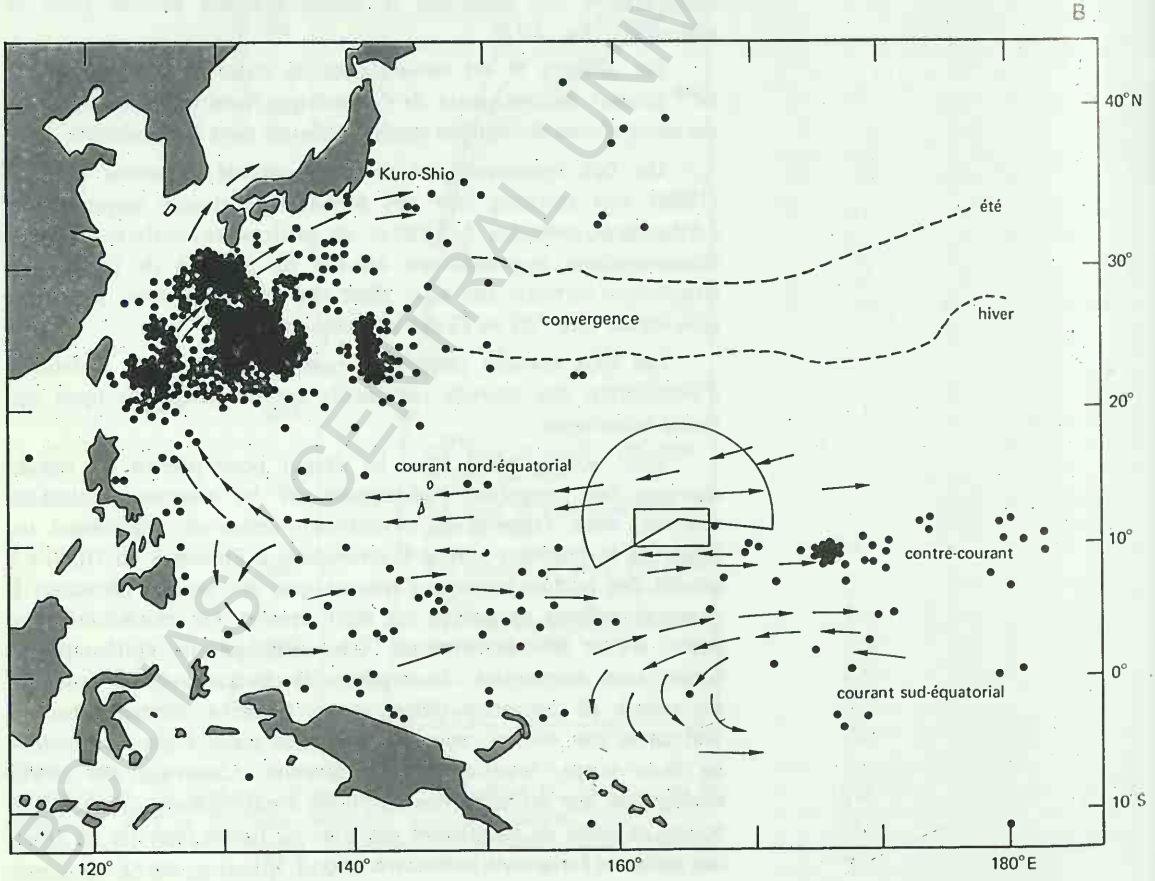
Les plus grandes réserves s'imposent donc sur la technique d'élimination des déchets radioactifs par immersion au fond des fosses océaniques.

Bien que la place fasse ici défaut pour décrire les conséquences des retombées radioactives sur les chaînes trophiques marines, nous rappellerons simplement celles qui résultèrent de l'essai de la première bombe H américaine à Eniwetok en 1953. Le service des pêches japonais s'aperçut que des bonites capturées à plusieurs milliers de km de cet atoll avaient été contaminées au point d'être inconsommables. Des investigations systématiques furent alors entreprises : la cargaison de chaque chalutier japonais fut passée au compteur Geiger et les poissons donnant plus de 100 coups par minute, avec un compteur placé à dix centimètres de leurs corps, impitoyablement détruits. L'étendue des effets biologiques sur les pêcheries fut donc catastrophique ainsi qu'en atteste la carte de répartition des sites où furent capturés en 1954 des poissons fortement radioactifs (fig. 7.18).

(1) Le C^{14} n'est pas un produit de fission à proprement parler. Il se forme par irradiation de l'azote lors des expériences nucléaires dans l'atmosphère.

BCU IASI // CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY





BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CONSEQUENCES ECOLOGIQUES DE LA POLLUTION PAR L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

L'industrie nucléaire peut être source de pollution radioactive à trois niveaux d'activités : à celui de l'extraction et du conditionnement des matières fissiles, à celui de l'utilisation dans les réacteurs, enfin, à celui des installations de traitement des combustibles irradiés.

Si l'extraction des minerais radioactifs et leur traitement ne donne lieu qu'à une pollution très limitée, les potentialités de contamination sont beaucoup plus importantes au niveau des piles atomiques et surtout à celui des usines de traitement des combustibles irradiés.

Au niveau des réacteurs nucléaires, dont la fig. 7.19 représente le schéma de fonctionnement pour les principaux types actuels, deux possibilités de contamination radioactive pourraient être envisagées, soit en fonctionnement normal, soit en cas d'accident.

Parmi les divers arguments évoqués par certains groupes "écocontestataires" à l'encontre de ces centrales figure la probabilité d'explosion nucléaire dans le réacteur. Cela relève de la plus haute fantaisie. Toute possibilité d'emballement d'une pile atomique du type PWR ou BWR est exclue par la conception même de ces appareils qui sont autorégulateurs lorsque la température s'élève(1). En effet, la vaporisation du fluide caloporteur s'accompagne de l'arrêt de production des neutrons lents, et les réactions se ralentissent d'elles-mêmes.

En réalité, l'accident de référence, c'est-à-dire le plus gros ennui de fonctionnement qu'elles puissent connaître, consiste en la rupture du circuit primaire de refroidissement qui pourrait provoquer la fusion partielle du cœur. Comme des dispositifs internes de refroidissements de secours sont prévus et les réacteurs entourés d'un caisson étanche, toute fuite de radioéléments non volatils en cas d'échauffement anormal doit être exclue.

Actuellement, les réacteurs en service se rapportent à 3 types principaux (fig. 7.19).

1) Ceux du type uranium naturel-graphite-gaz. Ici, le refroidissement du cœur est assuré par du gaz carbonique sous pression, qui transfère ensuite les calories produites sur un circuit secondaire distinct au niveau d'un échangeur. Dans ce type de réacteur, les ruptures accidentelles des gaines qui entourent la matière fissile sont très rares, plusieurs années peuvent s'écouler entre deux ruptures consécutives.

Le principal élément radioactif contenu dans le CO_2 est l'argon^{41}, dont la période est de 2 h. Celui-ci est stocké au niveau

Figure 7.18
Contamination de l'Océan Pacifique par les expériences thermonucléaires américaines de 1954. La croix sur la carte A figure le polygone de tir d'Eniwetok. Remarquer l'extension progressive de la région contaminée. Les zones de retombées maximales sont hachurées. La carte B représente la répartition des zones de pêcheries où furent capturés des poissons très fortement radioactifs. Il existe une rigoureuse superposition entre les zones océaniques exposées aux plus fortes retombées et celles de contamination maximum de la biomasse. D'après Miyake in *Hood "Impingment of man on the ocean", Wiley ed., 1971, p. 571-86*

(1) Ceci est d'ailleurs également vrai pour les surrégénérateurs et les réacteurs HTR dont nous ne parlerons pas dans ce qui suit car ils sont encore au stade de prototype.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

de la centrale puis libéré après un temps suffisant pour qu'il ait perdu la majeure partie de son activité. A titre d'exemple, la centrale EDF de Chinon a libéré en 1970 environ 8000 curies d'effluents gazeux dans l'atmosphère, alors que les normes de la Commission internationale de Protection radiobiologique (CIPR) autorisaient plus de 10^6 curies.

Les réacteurs de ce type n'émettent par ailleurs pratiquement pas d'effluents liquides et solides. La filière uranium naturel–graphite-gaz apparaît donc peu contaminante pour l'environnement car elle ne rejette en définitive que de l'argon^{41}. Ce gaz rare, donc chimiquement inerte, et de période courte, ne peut donner lieu à aucun phénomène d'accumulation. On en vient alors à s'interroger sur les raisons qui ont conduit à l'abandon d'une filière aussi satisfaisante en ce qui concerne la radioprotection. Faut-il rappeler la baisse subite des fuels consentie par les pétroliers, qui coïncida avec la mise en route de la dernière centrale de ce modèle construite dans notre pays ?

2) Les réacteurs à uranium enrichi-eau pressurisée apparaissent nettement plus polluants que les précédents.

Bien qu'ils fonctionnent en circuit fermés, ces réacteurs présentent un certain pourcentage de rupture de gaines. En outre, d'autres raisons techniques contraignent à renouveler avec une certaine fréquence l'eau du circuit primaire.

Les ruptures de gaines provoquent la contamination du fluide caloporteur par des produits de fission : krypton^{85}, xenon^{133}, iode^{131}, de nature volatile ou gazeuse, et tritium. Ce radio-isotope de l'hydrogène se forme par réaction tertiaire à partir du bore contenu dans l'eau du circuit primaire. Les gaz rares radio-actifs et l'I^{131} formé sont rejetés dans l'atmosphère, le tritium dans l'eau du fleuve voisin, en respectant les taux limites prévus par la réglementation . . .

Plusieurs milliers de curies de tritium sont ainsi déversés annuellement dans les cours d'eaux pour chaque tranche de 1000 mégawatts produite par ce type de centrale.

En revanche, les gaz sont rejetés en quantité plus faible que dans le type précédent : quelques dizaines de curies par an. Cependant, ce type de réacteur libère de l'I^{131} très dangereux par suite de sa grande activité biologique, et du krypton^{85} qui peut s'accumuler dans l'atmosphère car sa période est de 10 ans !

3) Les centrales uranium enrichi-eau bouillante possèdent un circuit unique. Ici, la même eau assure le refroidissement du cœur et la mise en action des turbines à vapeur (fig. 7.19 c). Ce type de réacteur présente l'avantage de ne pas fournir de tritium. En revanche il émet des quantités importantes de krypton^{85} à la pression atmosphérique normale donc sous des volumes considérables. Ceci soulève de grandes difficultés, bientôt résolues, car il faut stocker le gaz pendant un temps suffisant pour que disparaissent les radioéléments à vie brève (1).

(1) Dans les plus récentes centrales BWR américaines, les gaz de ce type sont confinés, de même que le krypton 85, et non rejetés dans l'air après stockage.

ESU/ASU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

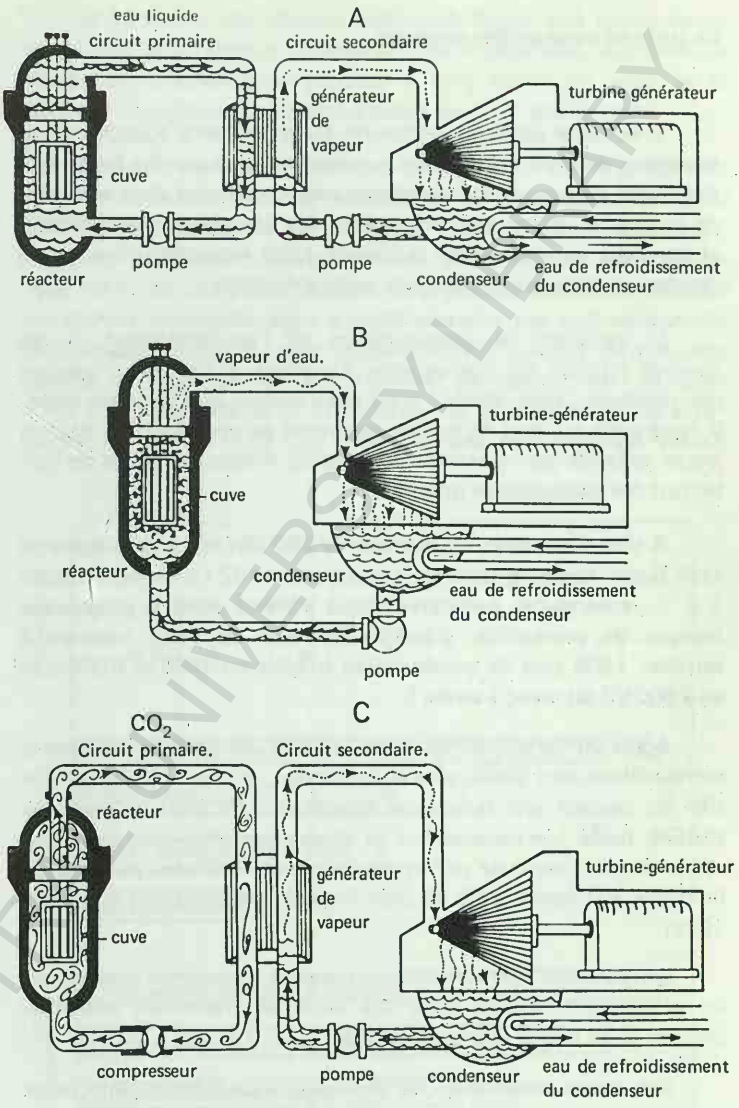


Figure 7.19
Principaux types de réacteurs de fission utilisés à l'échelle industrielle dans les centrales électriques nucléaires.
A – Réacteur à eau pressurisée, B – réacteur à "eau bouillante", C – Réacteur Uranium naturel – graphite – gaz (nec Cook in *Murdoch "Environment, Resource, Pollution", Sinauer ed. 1971, p. 263*

En conclusion, les réacteurs à eau, et plus précisément les PWR peuvent constituer une source significative de contamination par des gaz rares à période longue, par le tritium et par l'I^{135}.

Notons toutefois la possibilité technique de construire des réacteurs qui ne rejettent aucun résidu radioactif dans l'environnement (*"zero release"*). Dans un tel système, le Kr^{85} et l'I^{131} sont concentrés et stockés et le tritium recyclé dans le circuit primaire. Aux Etats-Unis, l'Edison Co. est en train de construire deux réacteurs de ce type près de Chicago. Ici, le problème des déchets radioactifs est reporté à un autre stade, celui des unités de traitement des combustibles irradiés.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le cycle du combustible nucléaire

L'industrie nucléaire comporte toute une série d'étapes qui se succèdent dans un ordre précis : extraction de la matière fissile dans des mines d'uranium, éventuellement enrichissement dans une usine de séparation isotopique, préparation des "éléments combustibles", séjour dans un réacteur de puissance, enfin extraction du cœur du réacteur et retraitement dans une usine spécialisée.

Le potentiel de contamination de l'environnement de ces diverses activités est très variable. Toutefois, si l'on peut imaginer des réacteurs "zéro release" il est assez évident que de toute façon, il faudra tôt ou tard se trouver confronté au problème des déchets lequel présente son maximum d'acuité au niveau des usines de traitement des combustibles irradiés.

A titre d'exemple, un réacteur de 900 MW (el) à l'eau légère de type Bugey renferme dans son cœur quelques 92 t d'uranium enrichi à 3 % rechargeable par tiers chaque année ! Ainsi le programme français de production d'énergie nucléaire de 1973 conduira à retraiter 1 500 t/an de combustibles irradiés en 1985 et 5 000 t/an en 2 000 s'il est mené à terme !

Après un certain temps passé en pile, les grappes d'éléments combustibles sont déchargées et conservées pendant 150 jours sur le site du réacteur afin qu'elles se désactivent. En effet, la masse de matière fissile correspondant à la production d'un kW émet à sa sortie de pile une dose de rayonnements de 700 rems par heure à un mètre, soit égale à la DL 90 pour l'espèce humaine (dans Lebreton, 1973).

Les éléments combustibles sont ensuite transportés avec toutes les précautions requises dans une usine de traitement afin d'en extraire entre autres le plutonium 239.

Ces usines constituent de beaucoup la plus importante cause de contamination de l'environnement par l'industrie nucléaire.

La plupart de la radioactivité est contenue dans des effluents liquides. Ceux-ci sont concentrés et stockés dans des récipients étanches. Toutefois, le krypton^{85} et le xénon^{133} ainsi qu'une partie de l'iode^{131} sont libérés dans l'atmosphère au niveau des évaporateurs qui servent à concentrer les déchets radioactifs. Par ailleurs, le tritium et une partie des produits de fission : Sr^{90}, Cs^{137}, ruthénium^{106}, césium^{144} et l'I^{131} sont déversés dans les fleuves et la mer avec les liquides de faible activité.

Une petite unité de traitement des combustibles irradiés élimine chaque jour 500 à 1 500 m^3 d'eau contaminée par ces divers radionucléides et aussi par 750 curies de tritium.

DCU INSTITUTE OF EDUCATION LIBRARY

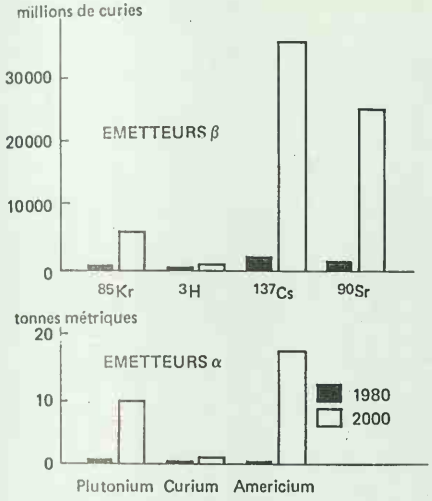


Figure 7.19a
Croissance des quantités de déchets radioactifs produits par l'industrie nucléaire européenne d'ici la fin du siècle (document O.C.D.E.).

Le problème des déchets radioactifs figure sans aucun doute parmi les plus sérieux problèmes d'environnement auxquels la civilisation technologique s'expose à long terme par suite de la boulimie énergétique dont sont atteints les pays développés.

Quelques données numériques prises parmi tant d'autres permettent de mieux situer le potentiel de contamination que représentent ces déchets. Si la production d'énergie électrique américaine est uniquement assurée en l'an 2000 par des réacteurs de type PWR, les Etats-Unis devront gérer chaque année une quantité de déchets radioactifs égale à celle produite par huit millions de bombes atomiques de type Hiroshima. En d'autres termes, cela signifie le stockage de 4 250 tonnes de résidus par an dont $8{,}6 \times 10^9$ curies de Sr^{90}, 10^9 curies de krypton^{85} et 36×10^6 curies de tritium ! Si ces deux derniers radionucléides étaient

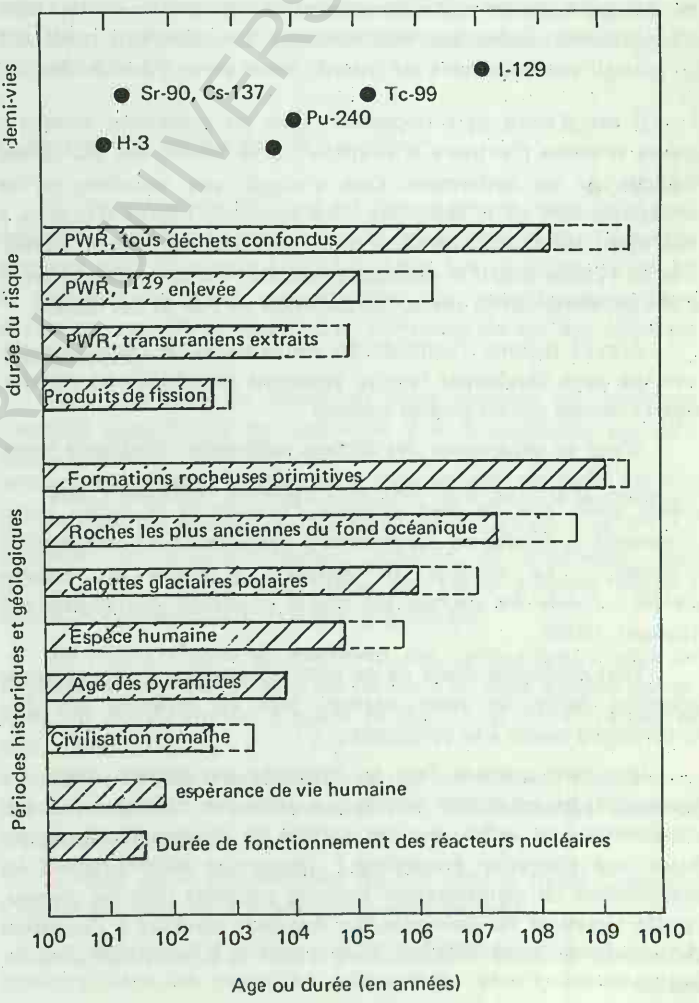


Figure 7.19b
Comparaison de la durée pendant laquelle les déchets nucléaires présentent des risques avec celle des temps historiques et géologiques. Cette durée du risque est définie arbitrairement comme celle qui expose un même danger que l'ingestion par voie buccale d'un minerai d'uranium à 4 %. (D'après Rochlin, 1977).

BOURSI / CENTRE UNIVERSITAIRE

rejetés dans l'environnement, le taux de pollution atmosphérique atteindrait un niveau inacceptable par rapport aux normes actuellement admises (Cook, 1971).

La durée pendant laquelle les déchets radioactifs devront être stockés à l'extérieur de la biosphère est très considérable. Comme il faut attendre une vingtaine de périodes pour qu'ils se désactivent de façon suffisante pour devenir sans danger, cela implique des durées de stockage extrêmement longues, à l'échelle des temps historiques voire géologiques (Fig. 7.19b). A titre d'exemple, celle-ci doit s'étendre sur 640 ans dans le cas de déchets contaminés par du Cesium 137 (période 32 ans) et sur 490 000 ans dans celui du plutonium 239 (période 24 500 ans) ! Qui prétendrait pouvoir se porter garant de l'étanchéité des containers pendant de telles périodes ?

La seule solution envisageable pour se débarrasser sans risque de ces déchets radioactifs serait de les déposer dans des mines de sel qui, par suite de leur nature même ne sont pas en contact avec d'importantes nappes aquifères. De plus, ces gisements possèdent un pouvoir autocolmatant qui interdit toute perte d'étanchéité.

Il est d'autre part impossible dans les conditions technologiques actuelles d'extraire le krypton^{85} et le tritium des gaz ou des liquides qui les renferment. Cela n'interdit pas, toutefois, de les entreposer hors de la biosphère. Une solution s'impose d'urgence à leur égard car si leur libération dans l'environnement devait s'effectuer au rythme actuel le développement de l'énergie nucléaire serait très vite limité par le niveau de pollution de l'air et des océans.

Jusqu'à présent, l'attitude des responsables de l'énergie nucléaire des pays développés face au problème des résidus est parfaitement résumée par les propos suivants :

"Pour se débarrasser des déchets radioactifs, l'industrie nucléaire est désarmée, elle ne peut ni détruire ni modifier les rayonnements émis. Elle ne peut protéger l'homme et le milieu qu'en diminuant la densité du rayonnement par dilution ou interposition d'écrans... La dilution, en abaissant la teneur en radionucléides... rend les déchets inoffensifs et permet leur dispersion" (Bovard, 1970).

Tout écologiste digne de ce nom, s'il ne peut qu'approuver la première partie de cette citation, sera en revanche des plus circonspects quant à sa conclusion.

Une telle attitude face au problème des déchets conduit à renouveler les errements relatifs aux pollution chimiques. Quand comprendra-t-on enfin que des normes de dilution inerte constituent une aberration écologique ? Ignore-t-on volontairement les phénomènes de concentration toujours possibles dans les communautés terrestres ou limniques, qui devraient conduire à l'adoption de normes dix mille fois plus sévères que ce qu'elles sont actuellement ?

CSAU / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

En réalité, le développement de l'énergie nucléaire soulève la question fondamentale suivante : qui doit être responsable de la lutte contre les pollutions dans une société technologiquement avancée ? Il est hélas d'usage, dans les pays développés, de charger les pollueurs du soin de contrôler leur propre pollution. Dans un rapport sur les juridictions anti-nuisances remis par le Professeur Rouvier au ministère de la Santé Publique en 1970, celui-ci écrit à juste titre : *"C'est en effet un paradoxe bien français et plus que jamais actuel, que de confier en matière de pollution la protection aux producteurs, la prévention aux promoteurs ! ... la solution passe par une expropriation, en tout cas au niveau du commandement des compétences de protection, au détriment des Ministères et organes de production".*

Est-ce d'ailleurs une simple coincidence si l'Académie des Sciences américaine a demandé vers la même époque *"de confier à une organisation réellement indépendante de l'organisme responsable de la pollution radioactive (l'AEC), la responsabilité de contrôler la libération de toute matière radioactive dans l'environnement" ?*

La destinée des résidus dans la biosphère

A l'exception du Kr^{85} qui est chimiquement inerte, la plupart des résidus radioactifs rejetés dans le milieu naturel par l'industrie nucléaire sont incorporés à l'hydrosphère. Les eaux des fleuves où se déversent les rejets peuvent subir des contaminations assez élevées par rapport au taux moyen admissible du fait des décharges intempestives.

Ainsi, les eaux du Rhône en Arles accusent des variations d'activité quotidienne de l'ordre de 3 à 32 picocuries par litre (radioactivité β).

Aux Etats-Unis, la rivière Columbia dans laquelle se déversent les effluents du réacteur de Hanford reçoit 150 pC /l de P^{32}. A Bradwell, en Grande-Bretagne, l'estuaire de Blackwater titre 5×10^{-2} pC /l de Zn^{63} au niveau des bancs d'huitres situés à 700 m de l'émissaire d'un réacteur graphite-gaz.

De même, l'usine de traitement des combustibles irradiés de Windscale contamine les eaux au niveau d'un tapis d'algues comestibles du genre *Porphyra* à raison de 8 pC/l de Ru^{106} (Foster et coll., 1971) (1).

De nombreuses recherches ont mis en évidence l'importance des phénomènes de concentration des radionucléides dans les biocœnoses aquatiques.

L'étude de la concentration du P^{32} dans la rivière Columbia a révélé des taux de contamination considérables.

Le tableau LXII montre que ce dangereux radionucléide peut atteindre dans les tissus des poissons les plus consommés par

(1) Nous regrettons de n'avoir pu disposer des taux de contamination du milieu marin par l'usine de traitement des combustibles irradiés de La Hague, similaire à celle de Windscale. Bovard (1970) précise que le taux de concentration du Ru^{106} dans les biocœnoses benthiques s'est révélé 10 fois supérieur aux valeurs prévues par ses expériences de laboratoire !

BOURSI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'homme des taux 5 000 fois supérieurs à ceux auxquels on le rencontre dans la rivière contaminée.

Le phytoplancton marin possède aussi de considérables capacités de concentration des radionucléides (cf. tableau LXIII). Dans le cas du Ce^{144} par exemple, le facteur de concentration atteint 100 000. Il est de l'ordre de 10 000 pour la plupart des radioisotopes étudiés.

Les chaînes trophiques marines peuvent donner lieu de ce fait à des phénomènes d'accumulation considérables de certains de ces éléments à partir des doses "admissibles".

Le tableau LXIV se rapporte aux effluents les plus dangereux rejetés par l'usine de Windscale. Il figure le coefficient de concentration des radionucléides les plus importants dans certains composants de la biocœnose benthique.

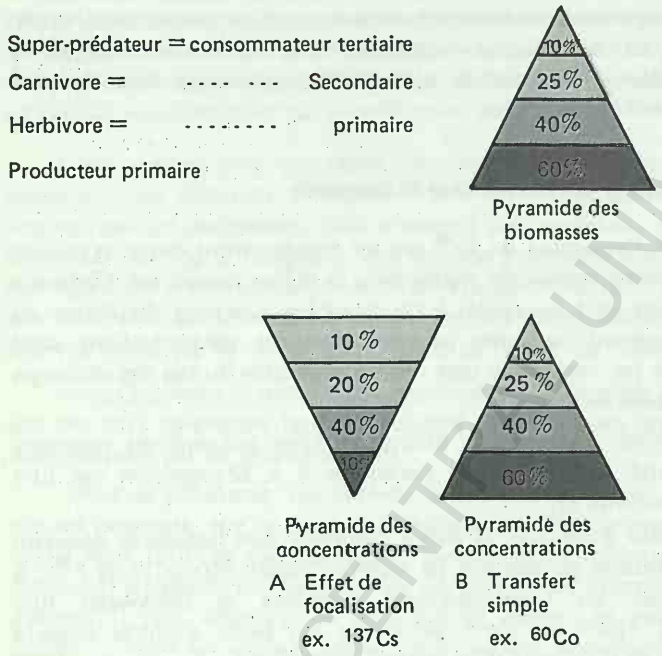


Figure 7.20
Différents modes de contamination des chaînes alimentaires. On distingue des radionucléides avec lesquels se produit une focalisation dans la pyramide écologique (cas du P32, du Cs 137 ou du Sr 90 p.e) et d'autres avec lesquels s'effectue un transfert simple (Co 60 p.e). (D'après Amiard-Triquet et Amiard, 1976).

Le tableau LXIV fait comprendre le danger potentiel que constitue pour la santé humaine la contamination des communautés océaniques par les radionucléides. Il montre aussi que les normes "légales" de dilution des effluents ne présentent aucune garantie réelle de sécurité contrairement aux assurances officielles prodiguées. Comme l'écrit fort à propos Lebreton (1973), le jeu des chaînes alimentaires amène à réclamer des facteurs de sécurité complémentaire de l'ordre de 10^4 ... par rapport aux normes établies sur la base d'une dilution "inerte" des rejets.

Faut-il rappeler que cette contamination des ressources marines a déjà soulevé d'inquiétantes questions de santé publique dans

Tableau LXII — Contamination par le P^{32} des chaînes trophiques de la rivière Columbia (réacteur plutonigène de Hanford). Coefficients de concentration dans les divers composants de la biocœnose.

	Eau	*Phyto-plancton*	*Macro-phytes*	*Insectes crustacés*	*Poissons**	*Oiseaux*
Chaîne trophique de l'homme (1)	1	1 000		500	260 5 000**	
Chaîne trophique des oiseaux ripicoles ou aquatiques (2)	1					
Hirondelles :						
jeunes	1		—	3,5		500 000
adultes	1		—			75 000
Canards	1		0,1			7 500 (oeufs : 200 000)

* espèces les plus consommées par l'homme.
** valeur maximale relevée en été.

(1) d'après Foster (1971)
(2) d'après Hanson et Kornberg (Odum)

Tableau LXIII — Accumulation de radioéléments en milieu marin (d'après Lowman et coll., 1971)

Elément	*Radionucléide*	*Période*	*Facteur de concentration dans le phytoplancton*
C	C^{14}	5 730 ans	4×10^3
Ce	Ce^{144}	265 jours	9×10^4
Co	Co^{60}	5,26 ans	10^3
Fe	Fe^{55}	2,6 ans	4×10^4
Pb	Pb^{210}	20 ans	4×10^4
P	P^{32}	14,3 jours	3×10^4
Zn		245 jours	2×10^4

Tableau LXIV — Facteurs de concentration des principaux radionucléides dans la biocœnose benthique aux environs de Windscale (Preston et Jefferies, 1969), par rapport à leur taux de dilution dans l'eau de mer

Espèces	Ru^{106}	Zr^{95}/Nb^{95}	Cs^{137}	Sr^{90}
Algues				
Fucus vesiculosus	330	1 700	100	6
Porphyra sp.	1 800	420	—	1
Mollusques				
Mytilus edulis	2 000	950	15	8
Patella sp.	1 200	750	70	15
Crustacés				
Langouste	25	10	25	—
Crevette	600	200	100	—
Poisson				
Carrelet	10	—	45	0,3

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

la région de Windscale. Les algues du genre *Porphyra* concentrent le Ru^{106} à un niveau 1 800 fois supérieur à celui de cet élément dans l'eau de mer. Les services de l'U.K.A.E.A. constatèrent en 1959 qu'un groupe d'habitants du pays de Galles comptant environ 25 000 personnes, était potentiellement exposé par voie alimentaire à des concentrations de Ru^{106} supérieures au maximum admis par la CIPR pour le groupe de haut risque ([1]).

(1) Pour les personnes exposées professionnellement aux radiations ionisantes, le risque "admissible" est 10 fois supérieur à celui du reste de la population, soit 1,5 rem/an.

Les Gallois du Sud consomment en effet de grandes quantités d'un concentré d'algues préparé à partir des *Porphyra.* L'enquête faite par les autorités compétentes a révélé que le groupe qui en utilisait le plus dans son alimentation arrivait à en ingérer une livre par jour ! Depuis 1960, les mesures prises ont fait diminuer le taux d'exposition (fig. 7.21 A,B) bien que celui-ci demeure assez élevé.

Des exemples comparables existent en ce qui concerne la consommation des poissons de la rivière Columbia (fig. 7.21 C).

Quand comprendra-t-on enfin que la contamination progressive du milieu marin se traduira inéluctablement par une inexorable croissance du nombre de personnes exposées par leur régime alimentaire à des doses de plus en plus proches du "maximum admissible" ? Ne craint-on pas aussi que la somme de ces "doses admissibles" mal inventoriées ne fasse une irradiation totale qui ne soit plus du tout "tolérable" ?

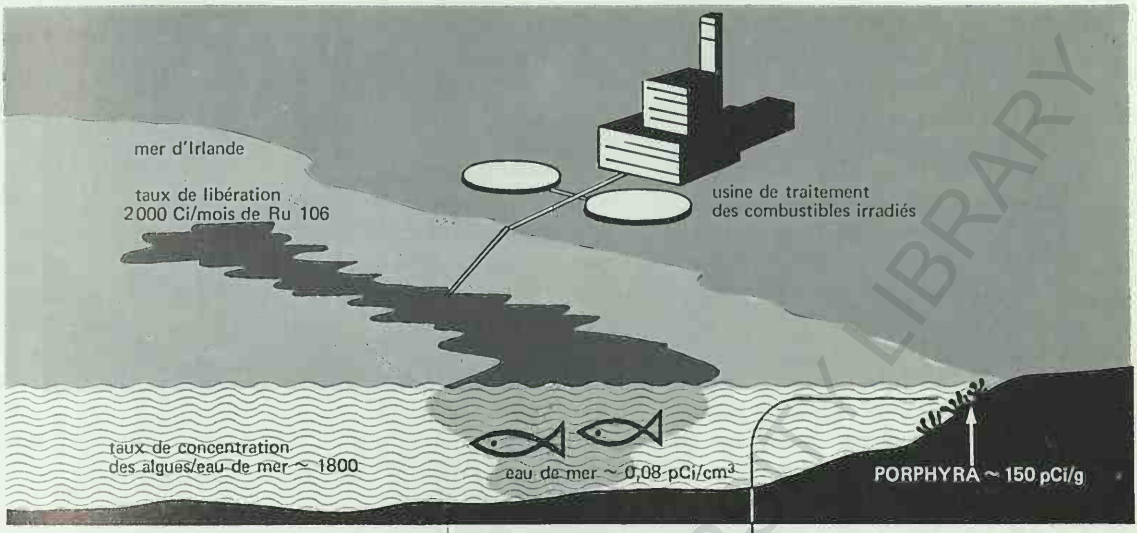
Des calculs réalisés sur la base d'un accroissement linéaire de la production d'énergie nucléaire avec dépôt de tous les déchets non volatils à plus de 4 000 m de profondeur ([1]) dans les océans montrent que la radioactivité de surface de *toutes* les eaux marines atteindra le niveau inadmissible de 540 pCi/l de Sr^{90} dans un siècle, (Miyake, 1971). Ce dernier auteur souligne aussi les dangers du rejet à la mer des résines contaminées par les sous-marins nucléaires. L'ingestion de ces résines d'échange par un seul individu par million de poissons peuplant la mer pourrait exposer 125 000 personnes par an à des taux dangereux de Co^{60}, Fe^{55} et Ta^{182} !

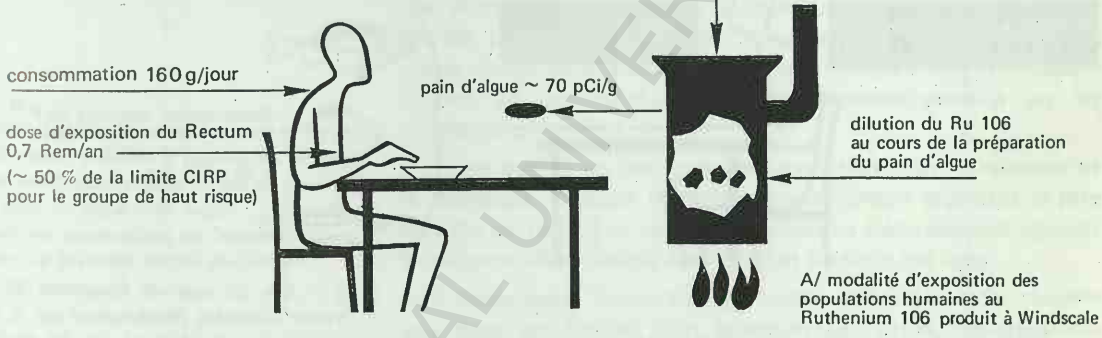
(1) En supposant un renouvellement en 300 ans des eaux abyssales.

En milieu terrestre, le potentiel de translocation des radionucléides par les végétaux n'est plus à démontrer. Dans le Midi de la France, l'utilisation, pour l'irrigation, des eaux du Rhône polluées par les effluents de Bugey, Marcoule, Pierrelatte et Cadarache, préoccupe les agronomes. Guenelon (1970) insiste sur ces risques et affirme que *"la dilution des décharges dans l'eau ne constitue pas à elle seule un moyen suffisant pour assurer des taux de pollution faibles"* dans le cas des cultures irriguées.

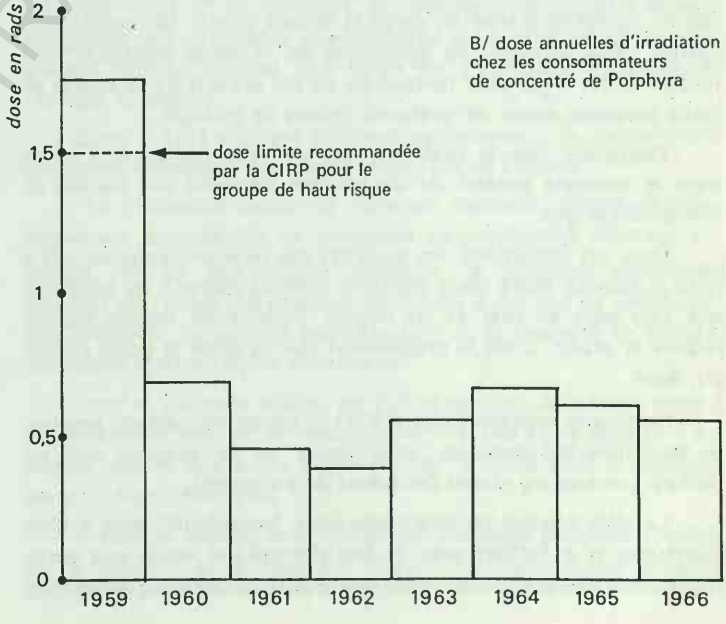
Le développement des applications pacifiques de l'énergie nucléaire apparaît donc aujourd'hui conditionné par divers impératifs d'ordre physiologiques et écologiques puisqu'il n'existe pas de niveau absolument inoffensif de radiations.

UNIVERSITY LIBRARY





A/ modalité d'exposition des populations humaines au Ruthenium 106 produit à Windscale

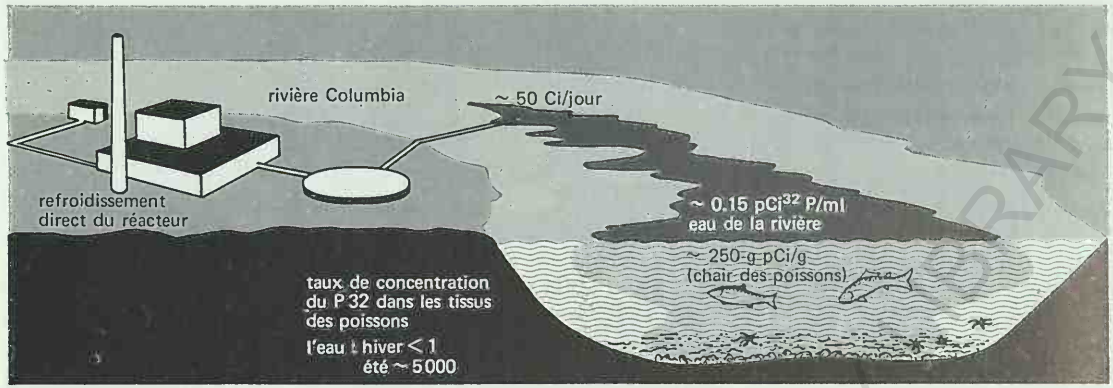


B/ dose annuelles d'irradiation chez les consommateurs de concentré de Porphyra

Figure 7.21

Contamination des chaînes trophiques humaines par le rejet dans l'eau des résidus radioactifs par des usines de traitement des combustibles irradiés, ou par des réacteurs.
A et B — Cas du Ruthenium 106 contaminant les eaux de la mer d'Irlande, à Windscale. Les algues Porphyra *qui servent à préparer un aliment (pain d'algue) constituent de redoutables concentreurs biologiques. Les grands consommateurs de ce produit sont soumis à une exposition de taux nettement supérieur à la limite admise pour l'ensemble de la population (0,17 rem/personne/an). Avant que des mesures plus sévères de radioprotection ne soient prises, les consommateurs de pain d'algue étaient même exposés à une dose supérieure à celle du maximum admis par la C I R P pour les travailleurs de l'industrie nucléaire (fig. B)*

RUTGERS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



C — Cas du rejet de Phosphore 32 dans la rivière Columbia (Washington) par le réacteur plutonigène de Hanford. Ici, les chaînes trophiques critiques sont constituées par celles des divers poissons d'intérêt économique. D'après Foster, Ophel et Preston, in *"Radioactivity in the marine environment", Ac. Nat. Sci. U S, Washington 1971, p. 251, 4 et 5*

Mais avant d'aller plus loin dans notre argumentation, nous devons toutefois mettre en garde le lecteur contre des conclusions hâtives. Très souvent, les adversaires de "l'atome pacifique" ont recours à des arguments fantaisistes ou qui prêtent à rire auprès de toute personne douée de quelques notions de biologie.

Rappelons que le problème des centrales nucléaires s'inscrit dans le contexte général du doublement décennal des besoins en énergie électrique.

Dans ces conditions, les autorités des pays industrialisés ont à faire la balance entre deux éléments contradictoires : les bénéfices que l'on peut en tirer et les risques. Réduire les risques signifie réduire le profit. C'est là précisément que se situe le point crucial du débat.

Comme le souligne Cook (1971), il est techniquement possible de construire des centrales "zero release" et de récupérer tous les déchets produits au niveau des usines de traitement.

Le kWh produit ne serait plus alors "compétitif" avec le kWh thermique et *a fortiori* avec le fuel domestique vendu aux particuliers. Les pétroliers ont certes tout intérêt à différer l'avènement

SCIENCE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

du chauffage tout électrique et de façon générale le développement de l'électro-nucléaire. N'ont-ils pas récemment reproché à l'EDF le gaspillage énergétique que constituerait la substitution de l'électricité au fuel dans le chauffage individuel ? C'est sur ce point là, d'ailleurs, que la querelle faite à l'électronucléaire est sans doute injuste. On connaît bien les risques de la pollution radioactive mais l'on feint d'ignorer ceux de la pollution chimique. A-t-on songé aux volumes de SO_2 et de divers gaz imbrûlés et autres composés mutagènes et carcinogènes *eux aussi,* que déversent légalement dans l'air des villes les centrales thermiques, les chaufferies et les moteurs à combustion interne ? Combien de μg de benzopyrène sont produits par Kwh thermique et quel "risque admissible" leur est associé ? Faut-il rappeler les ravages causés par l'usage des hydrocarbures sur la santé publique en milieu urbain ? Nous croyons pouvoir affirmer, en tenant compte de la quantité totale d'électricité actuellement consommée en France, que la protection de l'environnement de l'homme serait mieux assurée par l'utilisation de l'énergie nucléaire que des fuels lourds pour produire ces Kw. A condition que cesse la croissance de la demande d'énergie, il est des plus probable que le "risque admissible" serait, pour le même niveau de production, nettement moindre avec le nucléaire qu'avec les innombrables polluants chimiques produits par les combustibles fossiles ([1]).

(1) Faut-il rappeler la bienveillance de la législation française actuelle à l'égard des gaz de combustion d'hydrocarbures quand on la compare à celle en vigueur en Suède ... pays où cependant les responsables de l'environnement envisagent de la rendre encore plus sévère ?

Une égalisation des normes antipollution entre le nucléaire et le thermique classique rendrait irréductiblement prohibitif le prix du kWh au fuel. Il en suffit pour preuve les atermoiements opposés à l'exigence d'une simple désulfuration partielle des fuels.

Remarquons cependant que notre affirmation n'est valable que dans les limites d'un plafonnement de la consommation d'énergie. Mais si au contraire est admise comme seule finalité acceptable une croissance exponentielle de la production, les plus grandes réserves doivent être faites sur l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.

Cook (1971) souligne d'ailleurs parfaitement les risques d'une croissance démesurée des usages industriels de l'atome :

"La croissance rapide de l'énergie nucléaire, écrit-il, *le développement considérable de complexe agro-industriels littoraux alimentés par de gigantesques réacteurs, la pollution potentielle résultant de l'usage des explosifs nucléaires à des fins de génie civil, font présumer un énorme accroissement de la quantité de déchets radioactifs dont on devra se préserver".*

Dans le contexte actuel, les biologistes ont de bonnes raisons d'appréhender que ne se renouvellent — à une autre échelle — les mêmes erreurs que celles commises par le passé dans le domaine des pollutions chimiques.

Il faut le répéter avec force, les pratiques présentes fondées sur la dilution et le rejet des déchets n'offrent aucune garantie pour la protection de l'environnement de l'homme. Comme nous

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'avons déjà écrit, elles ne peuvent se poursuivre sans un accroissement significatif de la radioactivité du milieu naturel.

L'attitude des autorités responsables de l'énergie nucléaire, les décisions que prendront les instances internationales en ce domaine au cours de cette décennie, seront sans nul doute capitales pour l'avenir de l'espèce humaine. Elles devront faire table rase des comportements ataviques dont notre civilisation a hérité de l'ère protoindustrielle. Elles devront se fonder sur les données scientifiques les plus rigoureuses et sur les plus hautes préoccupations éthiques. Enfin, leur exécution devra être réalisée avec les plus grandes précautions requises.

Quand on analyse avec réalisme l'ampleur de la crise énergétique menaçant la civilisation contemporaine, on peut prédire sans peine que la rigueur ou la "compréhension" avec laquelle les administrations compétentes des pays industrialisés contrôleront l'usage pacifique de l'atome au cours des dernières décennies de ce siècle conditionneront la pérennité ou la déchéance de l'espèce humaine. Souhaitons qu'en ce domaine la protection de la biosphère ne soit pas à nouveau sacrifiée à la recherche du profit maximum.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

"On verra sur la terre des créatures qui s'entretueront sans cesse. Leur méchanceté n'aura point de limite ; leur violence détruira les grandes forêts du globe ; et même après s'être rassasiées, elles ne cesseront point pour cela leur désir de répandre le carnage, les tribulations et l'exil parmi toutes les créatures. Il ne restera rien sur terre, ou sous les eaux qui ne sera pourchassé et exterminé, et ce qui est dans un pays déporté dans l'autre".

Léonard de Vinci : *Prophéties*

TROISIÈME PARTIE

LA SUREXPLOITATION DES RESSOURCES NATURELLES ET LES LIMITES DE LA BIOSPHÈRE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE VIII

Chapitre VIII — La dégradation des biocœnoses et la ruine de la biosphère 453

La destruction de la végétation 453
Altération physico-chimique des sols 468
L'altération des sols par le sel 468
La latéritisation 471
L'érosion des sols 472
L'extermination de la faune 477
L'extermination des animaux terrestres 477
Les grands massacres du XIX^{e} siècle 481
Causes actuelles de défaunation 483
L'épuisement des richesses océaniques 487

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

"Avec le développement de l'industrie et l'avènement de la société scientifique, la dégradation de la nature s'accélère dangereusement et la faune va vers son extinction. Si rien ne fait obstacle à la dévastation, on peut prévoir un moment où seuls subsisteront sur la terre ferme, quelques végétaux verts alimentaires, des bactéries, des champignons et quelques rares animaux anthropophiles. Il ne s'agit pas d'une prévision car la marche vers un monde sans vie animale est bel et bien commencée".

P. P. Grassé : *Réflexions sur l'aménagement des Parcs Nationaux*

VIII
LA DEGRADATION DES BIOCOENOSES ET LA RUINE DE LA BIOSPHERE

La dégradation des biocœnoses figure au premier rang des multiples modalités par lesquelles l'humanité surexploite sinon gaspille les ressources naturelles.

Dès l'aube du quaternaire, les hominiens commencèrent à marquer de leur empreinte les écosystèmes continentaux. Depuis, aucun biotope quelque peu étendu, aucune communauté vivante n'a pu échapper à l'action de l'homme.

LA DESTRUCTION DE LA VEGETATION

Les communautés végétales furent les premières victimes des chasseurs paléolithiques par suite de l'usage du feu (cf. chapitre II, p. 92). Cependant, le recul des immenses forêts pleistocènes des moyennes latitudes ne prit vraiment de l'ampleur qu'après l'apparition des premières civilisations agraires, au Néolithique. On sait aujourd'hui qu'en Europe du Nord, à l'image de l'évolution observée dans le bassin méditerranéen, les premières atteintes à la sylve würmienne remontent à la fin du Mésolithique. Il y a plus de dix millénaires, les anciens habitants du Danemark pratiquaient, à l'aide de la hache de pierre et du feu, la culture sur brûlis, comme on

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'observe encore de nos jours chez certains peuples primitifs des Tropiques (Iverson, 1956).

Mais si la mise en valeur de nouvelles terres cultivables fut et demeure un facteur primordial de déforestation, bien d'autres motifs concourent pour accentuer ce phénomène et font redouter aux écologistes l'anéantissement de la plupart des biomes forestiers d'ici la fin du siècle.

La pratique du pacage en forêt, le surpâturage, fréquents en bien des contrées, et pas seulement dans le tiers-monde, condamnent à terme les boisements qui leur sont livrés car ils entravent ou interdisent toute régénération.

Par ailleurs, l'emploi du bois comme matière première représente une importante cause de destruction des forêts.

L'expansion de toutes les civilisations s'est accompagnée d'un usage accru du bois qui constituait le seul combustible disponible avant l'ère industrielle. Aujourd'hui, encore, il est largement utilisé comme source d'énergie dans bien des pays du tiers monde. En 1958, 55 % de la production mondiale, soit 550×10^6 tonnes, ont servi à cet usage, incroyable gaspillage quand on songe que le rendement énergétique de la combustion du bois est en moyenne de 25 %. Certains pays dits en voie de développement, comme le Zaïre, ravagent de nos jours leurs ressources forestières pour faire fonctionner les chaufferies de leurs usines (*). Ils renouvellent ainsi, mais avec des conséquences encore plus redoutables, les erreurs faites par le passé en Europe, sous l'ancien régime, à l'époque où la sidérurgie avait recours au charbon de bois pour réduire l'oxyde de fer. Comme le souligne Duvigneaud (1967) :

"La fonte primitive des minerais, les industries diverses faisant appel au bois qui se sont développées dans le bassin méditerranéen, terre cuite, verre, habitations, constructions navales, ont entraîné l'anéantissement de vastes étendues de forêts. Il n'a pu exister autrefois de grandes marines sans des forêts étendues de cèdres ou de chênes. Entre le XVI^e et le XIX^e siècle, des surfaces considérables des forêts d'Europe étaient transformées en charbon de bois par les maîtres de forge... nos forêts et nos champs en portent encore les stigmates inaltérables..."

Mais loin de plafonner, l'abattage du bois a encore pris de l'importance dans la civilisation contemporaine. Les usages industriels de cette matière première se diversifient par suite de ses exceptionnelles qualités de résistance et de légèreté ainsi que de sa composition chimique très originale.

La consommation mondiale de bois croît de façon ininterrompue et à un rythme supérieur aux prévisions des experts. Ainsi, des prospectives faites en 1952 prévoyaient une demande annuelle de 700 millions de m^3 en 1970 (URSS exclue) : en 1958, les abattages avaient déjà dépassé les 1 200 millions de m^3 par an !

Particulièrement élevée, la consommation de papier exerce une pression préoccupante sur les ressources forestières européennes. La

(*) Communication orale de Lambinon, Protecna, Rouen, 24 octobre 1971.

BOTANICAL UNIVERSITY LIBRARY

production mondiale de pâte à papier s'élevait à 40 millions de m^3 en 1958. La Suède en a produit à elle seule 7 700 000 tonnes en 1969 ! Les pays industrialisés sont d'insatiables consommateurs de papier. Journaux, hebdomadaires, livres, sont tirés à des millions d'exemplaires. On peut calculer qu'une édition quotidienne du "Monde" de Paris consomme à elle seule la production nette annuelle en bois de 160 hectares d'épicéas !

Dès 1958, l'ensemble des coupes effectuées en Europe (309×10^6 m^3) dépassaient déjà la productivité annuelle (282 millions de m^3). On peut avoir d'ailleurs quelques préoccupations pour l'avenir du patrimoine forestier de notre pays. Tout citoyen conscient de l'impérative nécessité d'une protection de la Nature est de plus en plus inquiet des nouvelles méthodes de "gestion" qui prévalent dans l'administration actuelle des forêts.

Dès 1967, avec une production de 5 m^3 de bois (1) par hectare et par an, l'abattage dépassait déjà largement la productivité biologique de la forêt française, estimée en moyenne à 2,5 m^3/an par Duvigneaud pour l'ensemble des boisements européens.

Cela signifie qu'au nom de la rentabilisation et de la productivité (2), symbolisée par la pratique des coupes rases et l'usage du bulldozer, l'ONF a entrepris de consommer non seulement la production biologique (intérêt) mais aussi l'ensemble de la biomasse (capital), version moderne et technocratique de "l'après nous le déluge". La situation est d'ailleurs si grave pour l'avenir de notre patrimoine forestier qu'un livre blanc intitulé *"SOS forêt française"* a été récemment publié par le Syndicat national des personnels techniques des forêts.

En conclusion, ce qui se réalise un peu partout en France dans le domaine forestier n'augure rien de bon pour l'avenir, et laisse entrevoir la ruine d'un magnifique effort de restauration entrepris depuis le début du siècle dernier. Aucun biologiste n'est dupe des statistiques officielles produites qui suggèrent une croissance de la surface des forêts dans notre pays.

En réalité, si ces dernières figuraient l'évolution de la forêt française non pas en terme de superficie couverte mais de *biomasse sur pied,* elles mettraient en évidence non pas une croissance mais une régression des boisements au cours de la dernière décennie car le rythme des abattages excède nettement la productivité nette annuelle en bois.

C'est en terme de biomasse qu'il faudrait faire les comparaisons. La substitution à de magnifiques futaies de feuillus, de jeunes plants d'épicéas alignés au cordeau, si elle est équivalente en superficie et en "productivité" administrative, ne l'est plus du tout sur le plan scientifique. Elle constitue a bien des égards une hérésie écologique et s'accompagne d'un appauvrissement de l'écosystème.

(1) D'après *"Les Français et leur forêt"*, brochure éditée par la Direction des Forêts, *Ministère de l'Agriculture*, 1967.

(2) "La dégradation des résultats de l'ONF au cours des dix années à venir tend à ce que le taux de croissance de sa productivité se trouve nettement inférieur à celui de l'ensemble de l'économie nationale... il faut à tous les niveaux créer une *obsession de la productivité*". C'est en ces mots que s'adressait le Directeur général de l'ONF à ses subordonnés lors des Journées d'étude de janvier 1970.
Pour les biologistes, la façon la plus "rentable" d'utiliser la nature est, ils le savent bien, de la détruire...

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Une futaie jardinée de hêtres et de sapins caractérise une communauté stable, garante de la pérennité du milieu, et de productivité biologique bien supérieure à ces boisements monotones de résineux dont l'ordre apparent symbolise en réalité la mauvaise utilisation du biotope.

Les habitats artificiels ainsi créés sont d'une pauvreté affligeante par rapport aux communautés climaciques. Comme l'écrit Dorst (1965) : *"la tendance actuelle de la foresterie moderne est de considérer la forêt comme une exploitation d'arbres utiles à l'homme, un "champ d'arbres" comme il y a ailleurs un champ de blé : les uns et les autres sont artificiels aux yeux du biologiste qui assiste à la disparition de communautés naturelles (*) au sujet desquelles les statistiques peuvent entretenir des illusions".*

Mais il y a pire dans la mesure où la substitution des résineux aux feuillus menace aussi la structure pédologique de certains sols. L'humus acide des conifères provoque ou favorise leur podzolisation et laisse envisager la ruine de leur fertilité à long terme.

L'agriculture fut et demeure, plus encore que la production de bois, une cause essentielle de déforestation. Les grandes atteintes aux biomes forestiers commencèrent avec l'extension du sédentarisme consécutif à sa naissance, au début du Néolithique. Ce n'est pas un hasard si le déboisement a atteint les niveaux les plus catastrophiques dans les pays où naquirent les plus anciennes civilisations : Chine, Vallée de l'Indus, Bassin méditerranéen et Mexique.

En Europe centrale et septentrionale, le défrichement de la forêt ne devint vraiment important qu'à la fin du premier millénaire de notre ère. A l'époque romaine, les neuf dixièmes du territoire européen étaient recouverts par l'immense forêt hercynienne. Les communautés de moines défricheurs du haut Moyen Age colonisèrent progressivement des régions de plus en plus reculées, suivis de peu par le reste de la population, et ne laissèrent intacts que les massifs forestiers les plus inaccessibles. La forêt européenne était malgré tout encore importante au XVI^{e} siècle, époque où les armées de Charles Quint pouvaient traverser l'Europe de Cadix à La Haye sans quitter l'ombre des arbres. Cela paraîtra sans doute invraisemblable à quiconque a traversé les provinces méditerranéennes de l'Espagne ou les solitudes désolées des plateaux castillan et aragonais (fig. 8.1).

En 1958, la FAO évaluait à 140 millions d'hectares la surface totale des boisements européens (Russie exclue), soit encore 30 % de la surface de notre continent. Mais en réalité, une grande partie de celui-ci est située en Scandinavie et en Europe orientale. De plus, cette statistique comptabilise parcs, pépinières, plantations de peupliers qui n'ont rien à voir avec d'authentiques écosystèmes forestiers. En réalité, les boisements climaciques et *a fortiori* les forêts vierges sont rarissimes en Europe continentale.

La plus grande d'entre elles, celle de Bialowieza, en Pologne, couvre 5 030 hectares. On rencontre encore quelques reliques mira-

(*) La "régénération" actuellement en cours des hêtraies de Fontainebleau fournit un excellent exemple des ravages que provoque dans les biocœnoses naturelles le recours aux pratiques dites modernes de foresterie (Chassain et Ruter, 1972).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA LIBRARY

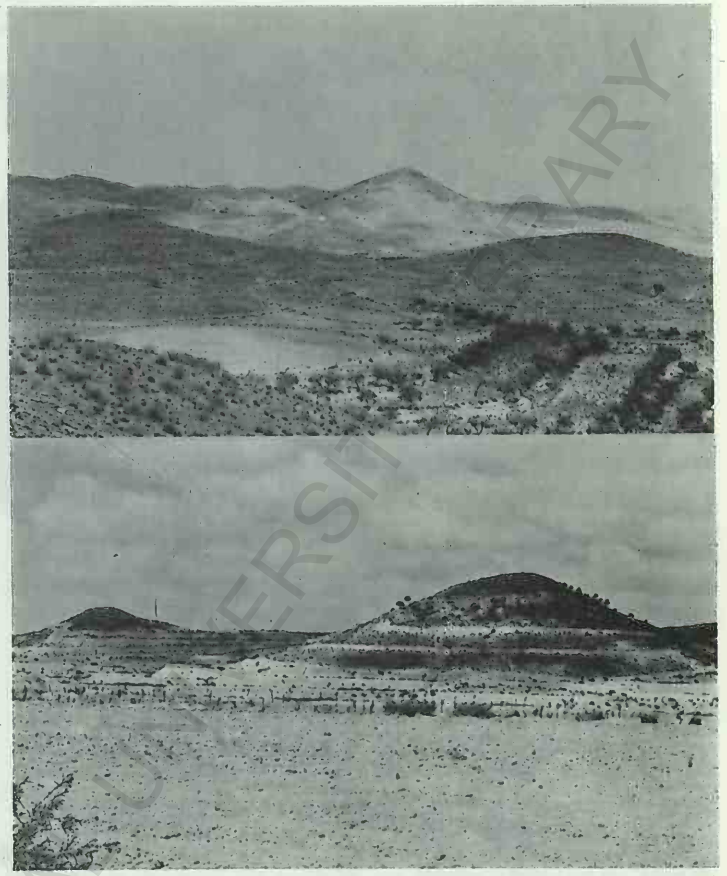


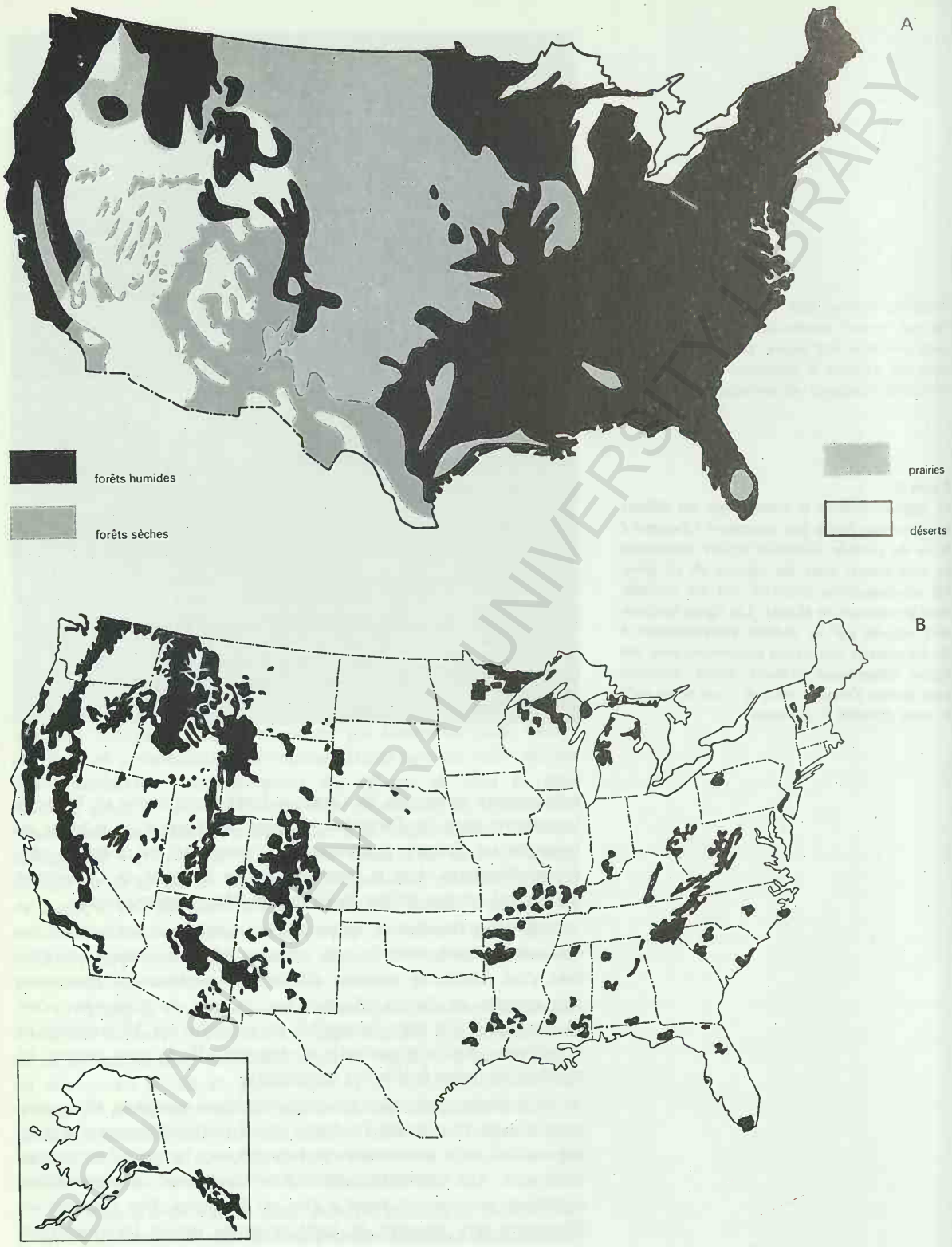
Figure 8.1
Le déboisement et le surpâturage ont détruit les immenses forêts qui couvraient l'Espagne à la fin du premier millénaire et ont transformé en semi-déserts bien des régions de ce pays. Les photographies ci-contre ont été réalisées dans la province de Murcie. Les lignes horizontales visibles sur les collines correspondent à des banquettes construites récemment avec des engins mécaniques — tardif effort entrepris pour limiter l'érosion des sols — ou de ce qu'il en reste (Clichés F. Ramade)

culeusement conservées de l'antique forêt hercynienne en Tchécoslovaquie et dans les Carpathes. Aucune forêt vierge ne subsiste en revanche en Europe occidentale, à l'exception de quelques centaines d'hectares dans la réserve intégrale italienne de Casentinesi (Apennins), vestige infime de l'immense hêtraie würmienne.

En Extrême-Orient, pays de très anciennes civilisations, le couvert végétal primitif a subi d'incalculables dommages. Le Chinois s'est comporté pendant des temps immémoriaux comme le pire ennemi de l'arbre. Aujourd'hui, le taux de boisement n'est plus que de 10 % dans l'ensemble de la Chine des 18 provinces et le nouveau régime a entrepris d'immenses efforts pour essayer de reboiser les flancs érodés des montagnes.

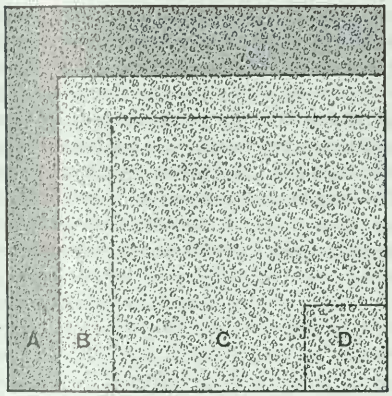
La déforestation de l'Amérique du Nord tempérée fut encore plus brutale. Le couvert végétal primitif des Etats-Unis a plus régressé en deux siècles que celui de l'Europe au cours du dernier millénaire. Les premiers colons du "Mayflower" abordèrent un continent entièrement boisé à l'est du Mississipi. Des 170 millions d'hectares que couvrait la forêt orientale depuis les rivages de

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



PCUIAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Figure 8.2
La régression des forêts aux Etats-Unis. En A est figurée l'extension primitive des écosystèmes forestiers, en B ce qu'il en subsiste de nos jours. D'après Dasman, 1972, mais modifié



A : surface forestière originale
370 x 10^6 hectares

B : surface forestière subsistante
288 milliers d'hectares

C : surface forestière encore exploitable
184 milliers d'hectares

D : forêts climaciques
ou peu modifiées
17,6 x 10^6 hectares

Figure 8.3
Modification de la surface forestière aux Etats-Unis depuis le début de la colonisation européenne. Il convient de noter que les 176 millions d'hectares de forêts exploitables, aujourd'hui subsistantes, sont dans leur majorité constitués par des plantations commerciales récentes ou par des forêts très modifiées, sans rapport avec les écosystèmes climaciques originaux. D'après U S Forest Service

l'Atlantique jusqu'à ce fleuve, il n'en subsiste qu'une dizaine de millions. Bien que de sérieux efforts de reboisement aient été entrepris au cours des dernières décennies, des 365 millions d'hectares à laquelle est évaluée la surface forestière initiale des Etats-Unis, il ne reste aujourd'hui que 260 millions en grande partie constitués par des plantations récentes et qui ne comportent plus que 18 millions d'hectares de forêts réellement climaciques ! (Dasman, 1972, p. 220 et fig. 8.2 et 8.3).

Même l'immense forêt boréale canadienne a présenté une régression spectaculaire depuis le début de la colonisation et la biomasse sur pied ne correspond même pas au tiers de sa valeur primitive.

De tous les écosystèmes forestiers du monde, ce sont incontestablement ceux des régions méditerranéennes qui ont subi les pires dommages du fait de l'homme. Seules quelques minuscules enclaves boisées, comme celle de Miljet en Yougoslavie, rappellent ce qu'a dû être le vaste biome forestier de chênes sclérophylles qui recouvrait toute la région mésogéenne du Maroc à l'Iran, à l'époque protohistorique (cf. pl. IV).

Le feu constitue le facteur primordial de régression de la forêt dans les pays méditerranéens, favorisé par l'aridité estivale qui caractérise ces biotopes. S'il est accidentel (ou criminel) de nos jours, tout au moins en Europe, il n'en fut pas toujours ainsi par le passé. L'homme méditerranéen a systématiquement fait usage du feu, depuis les temps les plus reculés soit pour préparer le terrain aux cultures, soit pour transformer des zones boisées en pâturages.

Si cette pratique de l'incendie automnal des forêts pour favoriser la repousse des herbages est aujourd'hui interdite dans la plupart des pays riverains de la Méditerranée, sa répétition à intervalle régulier a ruiné par le passé le couvert végétal spontané.

Il ne faudrait cependant pas penser que ce processus de dégradation soit aujourd'hui enrayé. Au cours de la dernière décennie, quelque 240 000 hectares de forêt ont ainsi brûlé en Provence et en Corse, soit 60 % du patrimoine forestier de ces territoires. Pendant le seul été 1970, plus de 26 000 hectares ont été incendiés en Corse.

C'est à l'action du feu qu'il faut attribuer l'existence de millions d'hectares de garrigues dans le Midi de la France (*). Peu à peu, les forêts méditerranéennes s'effacent et laissent la place à des écosystèmes dégradés, dont la biomasse est de plus en plus faible : garrigues sur sols calcaires, maquis sur terrains silicieux. Ces deux termes désignent des formations arbustives sempervirentes où la végétation, constituée par des espèces xérophiles, ne forme pas un couvert continu mais laisse au contraire par places de larges plaques dénudées où l'érosion du sol fait affleurer la roche. Les incendies répétés, causés par l'imprudence ou la malveillance, font étendre chaque année les garrigues en Provence et en Languedoc au détriment des lambeaux forestiers qui subsistent en ces régions.

(*) Il en est de même du chaparral californien, formation végétale dont l'extension est largement favorisée par les incendies périodiques.

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

Figure 8.4
Le chêne pubescent (Quercus pubescens) *constituait autrefois le boisement climacique de l'étage collinéen subhumide dans la région méditerranéenne occidentale. La hache et le surpâturage ont eu raison de ces immenses forêts dont il ne subsiste que quelques reliques très dégradées. Les chênes figurés sur cette photographie sont ceux de la forêt des Béguines, dans le Nord du Massif de la Sainte-Baume, en Provence (Cliché J.C. Ramade)*

Une comparaison de la chênaie de *Quercus pubescens* des Béguines, dans le massif de la Sainte-Beaume, avec les garrigues xériques du flanc sud de cette montagne permet de mesurer l'ampleur des dommages causés par l'homme méridional aux boisements climaciques (fig. 8.4 et 8.5 a et b).

Autre fléau des forêts méditerranéennes, le pâturage entraîne une dégradation progressive de la végétation arborée. Les pasteurs amènent leurs troupeaux dans le sous-bois pendant la période estivale qui dessèche les terrains de parcours. Les bovins, les ovins, les chèvres exploitent chacun une strate particulière de la végétation. Ils condamnent à terme la forêt car tous se nourrissent au détriment des jeunes repousses, interdisant ainsi sa régénération. En outre, les chèvres n'hésitent pas à monter aux arbres, pour en dévorer le feuillage. La défoliation qui s'en suit favorise leur attaque par les insectes xylophages.

L'action conjuguée de ces facteurs a porté un coup fatal aux forêts méditerranéennes. Aujourd'hui, celles-ci ne couvrent plus que 5 % de leur surface primitive, essentiellement en Europe et en Turquie. Au Maghreb, et plus encore au Proche-Orient, le désert s'étend en des lieux autrefois recouverts d'immenses forêts. Ainsi, les éléphants d'Annibal, de la sous-espèce *Loxodonta a. cyclotis,* inféodée aux zones forestières, étaient capturés dans le Sud tunisien ! A l'époque romaine, la Berbérie avait cependant déjà perdu plus de la moitié de son boisement initial, soit 100 000 km^2 de forêts ! En Israël, on retrouve des bornes judaïques limitant l'emplacement des forêts au sommet de collines aujourd'hui ruinées par l'érosion où les pédologues estiment qu'au moins un mètre de sol a été emporté, laissant l'argile ou la craie à nu (Lowdermilk, 1960) !

SOUSCRIPTION UNIVERSITY LIBRARY

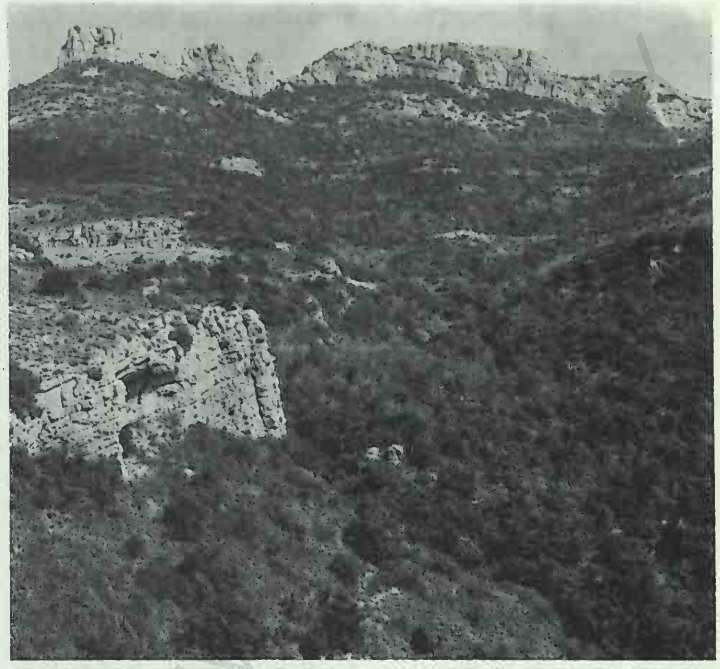


Figure 8.5 a
La garrigue représente un stade régressif des chênaies sclérophylles climaciques sur terrain calcaire dans la région méditerranéenne. Les espèces qui la composent appartiennent aux groupes les plus xériques de la communauté climax à laquelle elle s'est substituée. Cette photographie représente une vue du flanc Sud de la Montagne de la Sainte-Baume (Provence). La destruction systématique de la chênaie d'yeuses qui la recouvrait par les charbonniers puis par les incendies ont fait disparaître la forêt primitive. Entre les nombreux buissons de chênes Kermès qui constituent l'espèce dominante de cette formation s'observent quelques chênes verts (Quercus Ilex) *faisant des taches plus sombres sur le cliché. Ces arbres, très sévèrement concurrencés et croissant sur des sols squelettiques ne peuvent reconstituer l'antique futaie d'Yeuses (Cliché F. Ramade)*

Figure 8.5 b
Primitivement confiné aux éboulis et aux rochers anfractueux, le Kermès (Quercus coccifera) *est un petit chêne aux feuilles épineuses et au port buissonnant excédant rarement 2 à 3 mètres de haut. Ce pyrophyte, aussi apte à propager l'incendie qu'à repartir après son passage par émission de rejets par ses souches, constitue l'espèce dominante de la garrigue (Cliché F. Ramade)*

Le grand désert de Thar, au Pendjab s'étend de nos jours sur 150 000 km^2 dans un territoire qui était recouvert il y a 2 000 ans d'une jungle inaccessible. Ce désert gagne 8 km par an depuis le siècle dernier !

L'ensemble du territoire africain situé au sud du Sahara n'a pas été épargné par la déforestation. Aujourd'hui, seulement 17 % de ce continent est recouvert de forêts alors que son taux de boisement devait être de 60 % au début de notre ère.

Ici encore, ce sont les écosystèmes forestiers des zones à saison sèche prolongée qui en furent les premières victimes.

Au Soudan, dans le nord du Nigeria, le pâturage en forêt est un facteur essentiel de cette régression, *"L'activité incontrôlée de l'homme avec ses troupeaux présente des effets aussi sérieux sur la stabilité de la végétation que la venue d'un climat plus aride . . . en réalité, il n'existe aucune preuve d'un changement climatique fondamental dans cette zone depuis 4 000 ans . . . Il y a en revanche de nombreuses preuves de la destruction de la végétation par l'homme, en particulier par les pasteurs nomades".* (Fishwick, 1970).

De même, la description de la région de la Somalie qui s'étend entre le golfe d'Aden et Hargheisa, faite par les explorateurs de la fin du siècle dernier, nous présente un paradis de forêts peuplées par une riche faune de grands ongulés. Actuellement, à la suite de la destruction des arbres et du pâturage des chèvres, il n'y a plus ni forêt, ni animaux. En 70 ans ont surgi des centaines de kilomètres de nouveau désert (Pavan, 1969).

Non seulement ces boisements des régions à pluviométrie irrégulière, mais aussi la forêt ombrophile tropicale africaine régressent depuis le début de ce siècle à une vitesse alarmante (fig. 8.6). Ici, de nombreux facteurs conjuguent leurs effets pour ruiner le plus riche et le plus diversifié des biomes continentaux. Au nord et au sud, les feux de brousse allumés par les pasteurs nomades, la culture itinérante sur brûlis dans les parties équatoriales de la forêt vierge, enfin la hache du bûcheron et maintenant les bulldozers des Sociétés forestières conjuguent leurs efforts pour détruire un des plus remarquables ensembles vivants de la planète.

La pratique de la culture itinérante sur brûlis, encore fréquente en Afrique équatoriale, est une importante cause de déforestation dans les régions où une pression démographique excessive a fait par trop accélérer le rythme des rotations. Alors qu'il faut une vingtaine d'années pour la restauration de la forêt secondaire, bien souvent la mise en jachère est aujourd'hui inférieure à 7 ans, d'où épuisement des sols et érosion accélérée.

Par ailleurs, on n'insistera jamais assez sur l'action catastrophique de la colonisation européenne sur la forêt ombrophile tropicale. Les cultures industrielles effectuées sans discernement, parfois avec un mépris cynique des ressources naturelles des pays où elles furent installées, ont ruiné des millions de km^2 de ces antiques écosystèmes forestiers. Au Nigéria, depuis la fin de la seconde guerre mondiale, 250 000 hectares de forêt sont chaque année transformés en plantations de cacao, vite ravagées par l'érosion ; au Ghana, la culture du cacaoyer et d'autres plantes industrielles a réduit de 85 % la surface boisée du pays. En Afrique orientale, où existe une saison sèche marquée, l'ancienne forêt caducifoliée tropicale a été quasiment anéantie et ne couvre que 2 % des territoires kenyan et tanzanien.

En conclusion, on peut estimer aujourd'hui que la forêt tropicale africaine n'occupe plus que 40 % de son aire d'extension géographique antique (fig. 8.6).

Mais malgré la gravité des dommages subis par les forêts ombrophiles du globe, aucune d'entre elles n'a subi le sort de la forêt malgache (fig. 8.7 et planche XXV).

Il y a un siècle, l'île de Madagascar, de surface supérieure à la France, était aux trois quarts recouverte de forêts impénétrables. De nos jours, les deux tiers de son territoire sont sub-désertiques ! Seulement 30 % du pays sont encore boisés, mais ce chiffre est trompeur car il ne rend pas compte de la nature qualitative du couvert végétal.

Les forêts primitives malgaches présentaient une diversité extraordinaire et un endémisme remarquable, lié à l'ancienneté de

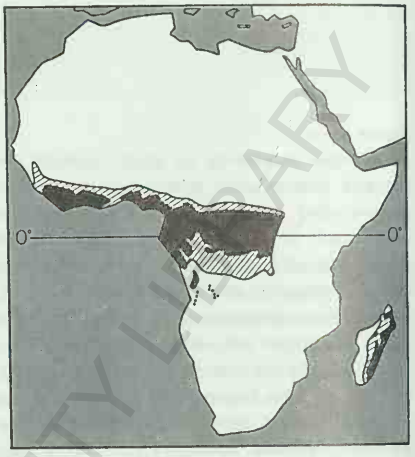


Figure 8.6
La régression des forêts ombrophiles tropicales en Afrique. En noir : aire d'extension actuelle. En hâchures : territoires anciennement recouverts par cette formation végétale. D'après Aubreville in *Dorst "Avant que Nature meure", Delachaux et Niestlé ed., 1965, p. 158*

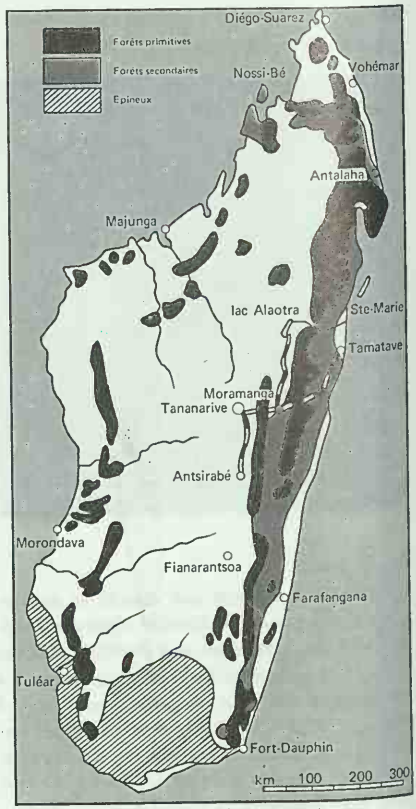


Figure 8.7
De toutes les régions tropicales du globe, Madagascar figure sans nul doute parmi celles où la déforestation présente la plus vaste ampleur. Autrefois couverte aux 8/10^e par des forêts cette île est aujourd'hui totalement déboisée sur les 3/4 de sa superficie. D'après Chauvet in *Biogéographie et Ecologie de Madagascar, Junk ed., 1972, p. 154.*

AQUASTAT CENTRAL LIBRARY

la séparation de Madagascar du reste du Gondwana. Sur 200 000 km² autrefois recouverts de forêts ombrophiles qui s'étendaient sur toute la partie orientale de l'île, il ne subsiste plus qu'une cinquantaine de milliers de km² dont à peine 30 000 peuvent être considérés comme peu ou pas dégradés (Aymonin, 1971). Dans la région de Majunga, seulement 15 % de la surface sont encore boisés et il ne demeure plus que de rares vestiges de l'ancienne forêt occidentale.

Le patrimoine forestier de tous les pays tropicaux sud-américains a également subi d'irréparables dommages du fait de l'homme, bien qu'il couvre encore 20 % de la surface de ce continent. L'immense Brésil a perdu 40 % de ses forêts depuis les débuts de sa colonisation.

La dernière grande forêt vierge du monde, l'Amazonie, est aujourd'hui menacée d'anéantissement. Incapables d'assurer le progrès de leur peuple grâce à un indispensable effort d'instruction publique, sans lequel aucun programme de contrôle de naissances ne peut être envisagé, les hommes politiques au pouvoir confrontés avec le raz de marée démographique ont entrepris d'ouvrir l'Amazonie à la colonisation [1]. Dans ce but, plusieurs routes intercontinentales ont déjà été construites, dont l'une coupe l'immense Parc National du Xingu !

De l'avis des spécialistes les plus qualifiés, nul ne peut aujourd'hui évaluer les conséquences que présentera pour l'équilibre de l'atmosphère planétaire, l'anéantissement total de la forêt vierge amazonienne, qui résultera de sa "mise en valeur", d'ici la fin de ce siècle.

Il semble que les hommes politiques, qui ont entrepris cette "grandiose opération" n'aient pas su tirer les conclusions de tentatives antérieures. Cependant, l'usage du bulldozer et des charrues multisocs ont déjà fait leurs preuves. Auprès des tronçons déjà construits de diverses routes transamazoniennes, certaines zones, pourtant proches de cours d'eau, sont devenues en peu d'années des déserts [2]. Les dirigeants de l'Institut de Recherches biologiques du Belem ont rappelé aux autorités l'anéantissement de vastes étendues encore couvertes il y a peu de temps par de rarissimes essences de bois précieux, "en raison de la précipitation des bâtisseurs de la transamazonienne". A lata, dans le nord de l'Etat du Mato Grosso, l'installation par le Gouvernement brésilien d'une colonie d'agriculteurs après destruction d'une luxuriante forêt ombrophile, s'est traduite en peu d'années par un lamentable échec. *"Ce qui était apparu comme un sol profond, avec une riche couverture humique, s'est désintégré après la seconde récolte et parfois même après la première... en moins de 5 ans, une magnifique forêt tropicale laissa la place à une cuirasse latéritique dénudée. Aujourd'hui, lata est une misérable colonie qui vivote sans espoir"* (Mac Neil, 1964).

Cet exemple nous montre la formidable gravité du problème que pose la fragilité des sols tropicaux ferralitiques. De façon plus générale, nous en venons maintenant à déterminer les mécanismes

(1) *"Ce qui aggrave l'inquiétude des protecteurs de la nature, c'est que, pour des motifs sociaux, la colonisation va être l'œuvre des bûcherons du Parana rendus chômeurs par la disparition des forêts et surtout des Cabocles du Nord-Est dont les méthodes de culture ont accéléré la désertification du Sertao... L'action de ces populations incultes sur la faune sera tout aussi grave"...* écrit Yeatman (1970).

(2) d'après M. Niedergang "Le Monde", 9 Février 1973, page 5.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

et les conséquences de l'exploitation par l'homme des écosystèmes climaciques.

La mise en valeur du milieu naturel par notre espèce se traduit inévitablement par une simplification des écosystèmes. Elle provoque l'apparition d'une succession de communautés dont la biomasse et la diversité sont de plus en plus faibles, dénommées par les écologistes une série régressive.

L'élimination du couvert végétal par la culture ou le surpâturage permet l'installation des processus d'érosion des sols qui parachèvent la ruine des écosystèmes dégradés. Dans d'autres cas, l'utilisation agricole des terres peut provoquer des perturbations irréversibles de leur structure pédologique et une perte totale de leur fertilité.

Le feu demeure de loin le principal facteur de dégradation des écosystèmes continentaux. En bien des régions tempérées, méditerranéennes ou tropicales, les paysages végétaux sont profondément marqués par son empreinte.

Le passage du feu bouleverse les conditions écologiques du milieu et élimine de nombreuses espèces végétales et animales. On a pu calculer que la destruction d'un hectare de pinède provençale provoque la mort de 30 oiseaux, 40 petits mammifères, plusieurs dizaines de tortues, serpents, amphibiens et plusieurs millions d'insectes (*in* Harant et Jary, 1967).

Mais en outre, l'incendie agit indirectement sur les biocœnoses car il modifie la concurrence interspécifique entre végétaux. Il favorise certains d'entre eux dénommés *pyrophytes* par suite de leur adaptation à l'incendie et quelques espèces animales endogées. En réalité, la transformation d'écosystèmes forestiers en habitats ouverts : landes, garrigues, chaparral, veld, savanes, a souvent eu pour but de favoriser les grandes espèces mammaliennes car elle étend la végétation herbacée disponible pour les ongulés.

Kuhnoltz-Lordat a étudié l'influence de l'homme sur la végétation méditerranéenne, au travers de ses pratiques culturales. Comme en bien d'autres régions du monde, la forêt *(sylva)* a été pour partie transformée par déboisement en terrains de parcours pour le bétail *(saltus)* et dans les vallées, et partout où les sols étaient profonds, en terres de cultures *(ager).* Il s'est ainsi établi une série régressive d'écosystèmes, de moins en moins diversifiés dans le sens *sylva* → *saltus* → *ager.* Le feu a joué un rôle déterminant dans cette transformation et dans le maintien des habitats ainsi modifiés. En certains cas d'ailleurs, la trilogie *sylva, ager, saltus* s'est traduite par l'établissement d'un judicieux équilibre agro-sylvo-pastoral qui, au cours des siècles, s'est accompagné d'une bonification des terres cultivées par transfert d'une partie des éléments nutritifs de la *sylva* et du *saltus* vers l'*ager* sans pour autant que le potentiel productif de la forêt et des pâturages n'en ait été affecté. Parfois, hélas, la pression démographique a conduit à des empiètements trop importants sur la *sylva* avec exploitation excessive des écosystèmes transformés et ruine progressive du milieu.

Planche XXI

Incendie de forêt en France méditerranéenne La partie occidentale de la montagne de la Sainte-Baume a éte ravagée en 1971 pour la 3e fois consécutive en moins de 30 ans par un gigantesque incendie qui a détruit près de 4 000 hectares de pins et de chênes.

1) Quelques jours après le sinistre. La dégradation consécutive des sols mis à nus par l'incendie est très apparente.

2) L'année suivante : recolonisation du milieu par des graminées pionnières.

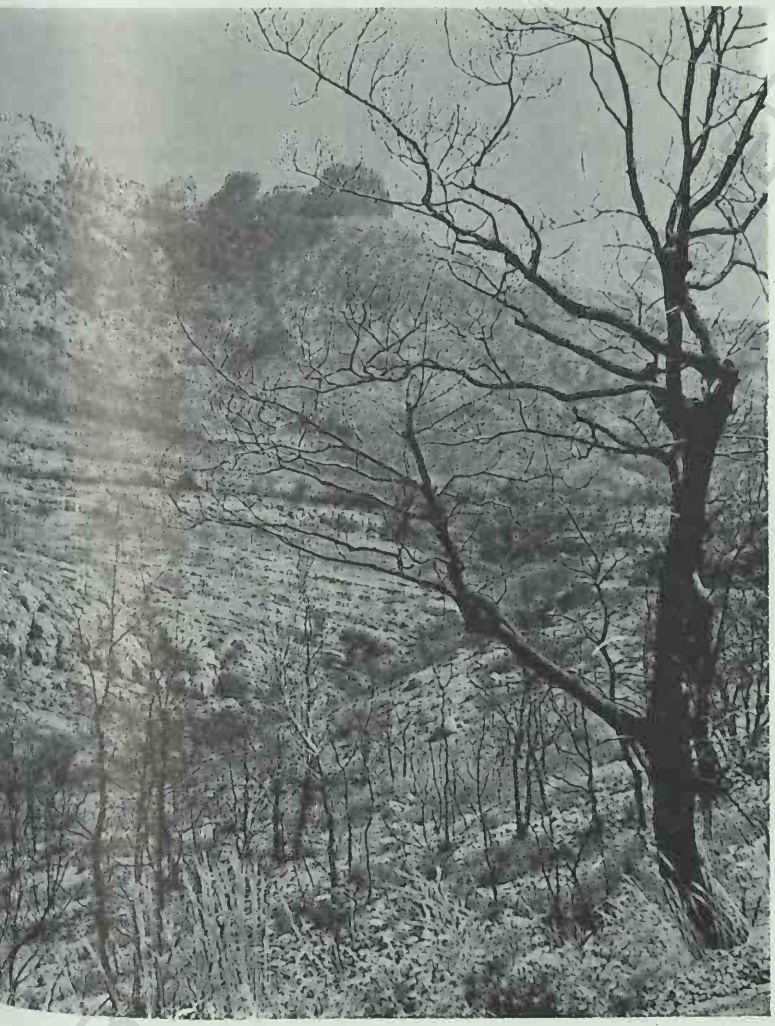
3) La végétation luxuriante qui couvre encore les flancs Nord de ce massif contraste avec la désolation des paysages des clichés 1 et 2.

(clichés F. Ramade)

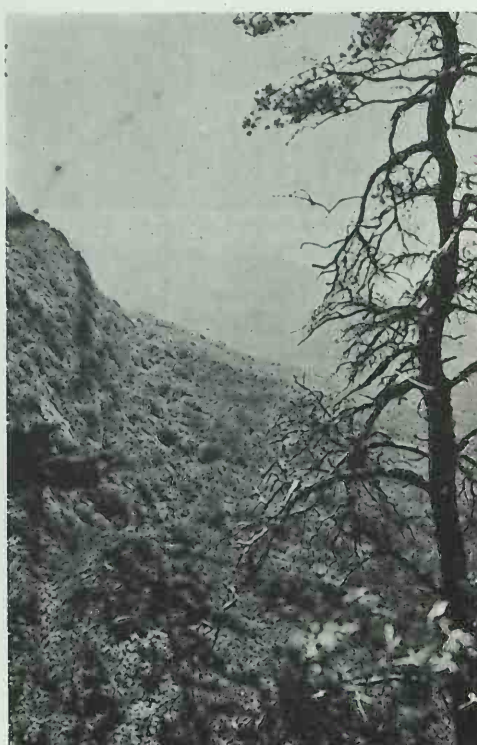
SOUTHERN UNIVERSITY LIBRARY

1

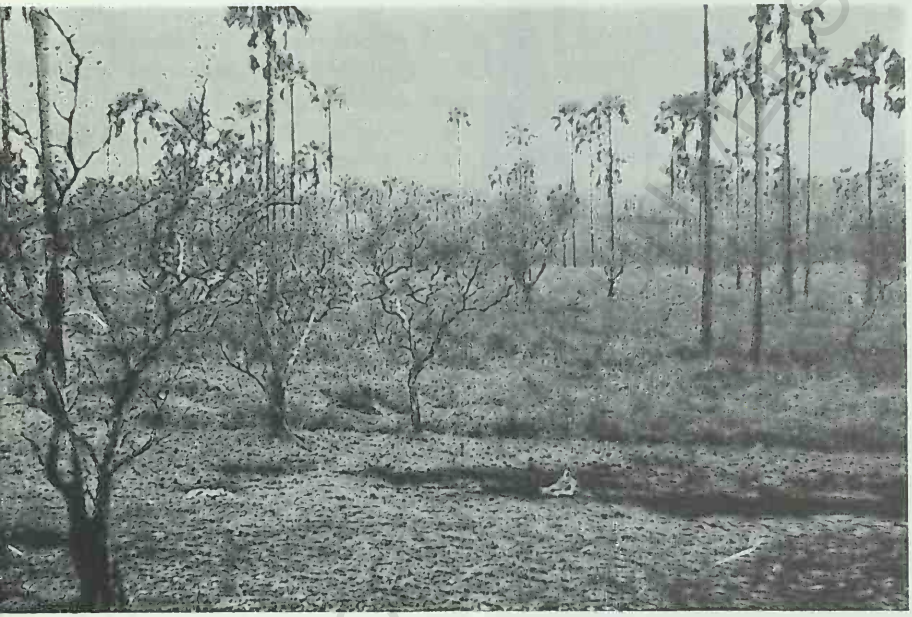
2



3



1



2

3

BCU IASI

L'usage du feu en pays méditerranéen a façonné le paysage végétal et s'est traduit par d'importantes conséquences écologiques. Kuhnoltz-Lordat distingue les incendies préculturaux, utilisés pour défricher la forêt, des feux culturaux destinés au nettoiement après la récolte, ou à la régénération de boisements de pins, enfin des feux pastoraux qui favorisent le tapis graminéen au détriment de la végétation arbustive ou arborée.

Le feu modifie beaucoup les facteurs physico-chimiques des biotopes où il se propage.

Les perturbations microclimatiques qu'il détermine sont très considérables. Elles se traduisent par un accroissement des fluctuations thermiques journalières et une aridification accrue. Il provoque aussi un bouleversement des conditions édaphiques.

Les incendies de forêts méditerranéennes constituent de véritables catastrophes écologiques car ils appauvrissent les sols et altèrent leur structure. Ils se propagent en général au point culminant de la période sèche estivale de sorte que les températures atteintes dans les couches superficielles sont très élevées. Il en résulte une combustion totale non seulement de la litière mais de l'humus, même en profondeur. En sus de cette perte de matières carbonées, il se produit aussi une déperdition d'azote par pyrogénation des composés organiques et même minéraux de cet élément. L'enrichissement en éléments nutritifs sous forme minérale n'est qu'apparent car les cendres sont entraînées par le vent et lessivées avec facilité par les premières pluies, très violentes sous les climats méditerranéens.

Planche XXII
Feux de brousse dans les savanes de Côte d'Ivoire
1) Incendie tardif (fin de saison sèche) en savane arbustive
2) Aspect de la savane immédiatement après le passage du feu
3) Repousse de graminées en début de saison des pluies. On remarque au premier plan une savane herbacée à Loudetia simplex *et dans le fond une savane arbustive.*
Des palmiers rôniers (Borassus aethiopum) *dominent la strate arbustive visible sur ces deux photographies.*
(clichés M. Lamotte, station de Recherches de Lamto)

La résistance à l'action du feu varie beaucoup selon les espèces végétales. L'incendie détermine donc des bouleversements biocœnotiques car il élimine les composantes floristiques les plus sensibles à son passage et modifie profondément, de façon indirecte la concurrence interspécifique.

Dans les pays méditerranéens, l'effet le plus évident des incendies consiste en la substitution d'une forêt secondaire de conifères aux boisements climaciques de chênes sclérophylles. Mais de nombreuses autres espèces arbustives ou herbacées sont éliminées et laissent la place à ces pyrophytes, favorisées par la répétition des feux.

Le chêne liège *(Quercus suber)* et divers conifères du genre *Pinus* résistent assez bien à l'incendie par suite de l'épaisseur de leur écorce. Tel est le cas du pin d'Alep, malgré sa haute inflammabilité, due à sa richesse en essences volatiles. En effet, quand le feu se propage rapidement dans le sous-bois, il respecte quelques grands arbres qui deviennent d'efficaces porte-graines (voir planche V.3). Il en est de même en Amérique du Nord avec le *Pinus ponderosa.*

Les cônes non déhiscents de certains conifères protègent les graines contre le feu et les libèrent après son passage. Les graines

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

d'autres espèces végétales comme les *Rhus,* et les *Coenotus* du Chaparral californien sont fissurés par la chaleur et germent mieux après un incendie (Lemée, 1967).

La combinaison de ces divers facteurs, jointe à la plus grande xérophilie des conifères précités, favorise ces essences au détriment des boisements climaciques de chênes sclérophylles. Ainsi, la forêt méditerranéenne incendiée laisse la place à un dysclimax constitué par des boisements de résineux (Pin d'Alep, pin maritime ([1]), pin laricio) au-dessous desquels croît une strate arbustive très diversifiée, constituée par diverses espèces ligneuses xérophiles dont des lianes (*Smilax aspera,* par exemple). La constitution par les conifères d'un humus acide et leur rapide croissance rend difficile la reprise du boisement primitif de chênes verts ou pubescents.

Mais lorsque les feux se répètent avec une trop grande fréquence, la forêt secondaire de pins est à son tour éliminée pour faire place à une autre formation végétale, la garrigue de chênes Kermès (Cocciferaie). Celle-ci constitue un écosystème dégradé, marqué par la présence de divers pyrophytes. Le Kermès *(Quercus coccifera),* petit chêne buissonnant n'excédant pas 3 à 4 mètres de haut dans les meilleures expositions (fig. 8.5), présente une grande résistance au feu grâce à son puissant système racinaire dont les bourgeons dormants se développent très vite après destruction des parties aériennes par l'incendie.

La destruction répétée de la garrigue à chênes Kermès conduit à une formation encore plus dégradée, la pelouse à Brachypodes *(Brachypodietum ramosi),* formation steppique parsemée de touffes de thym et de graminées rhizomateuses, —dont le Brachypode,— très résistantes au feu. On y rencontre aussi d'autres pyrophytes comme les cistes *(Cistus albidus).*

Lorsque l'incendie et le surpâturage conjuguent leurs effets, on atteint l'ultime stade de la série régressive, constitué par la lande à asphodèles, écosystème très dégradé dont le couvert végétal, constitué par des plantes bulbeuses et des thérophytes, forme un tapis discontinu entre lequel affleure le sol ou de vastes surfaces de roches nues (fig. 8.8).

Le feu provoque aussi de profondes modifications dans les communautés des régions tropicales. La dégradation du couvert végétal consécutive aux incendies et l'amoindrissement du potentiel productif qui en résultent constituent néanmoins un élément d'exploitation du milieu utile aux pasteurs car il accroît la proportion de la production primaire consommable par les herbivores domestiques.

La transformation de la forêt en savane grâce à la pratique des feux de brousse qui empiètent progressivement sur l'écotone forestier et font sans cesse reculer l'une au détriment de l'autre, constitue un phénomène quasi général dans la totalité des zones intertropicales du monde.

(1) Le pin maritime, malgré l'importance de ses peuplements en Provence, ne doit pas être considéré comme une espèce spontanée. Les boisements de pins maritimes du Var sont anthropiques (Chararas, 1964). Cependant, le Pin d'Alep et le Pin maritime peuvent être climaciques en certaines zones de la région méditerranéenne (Emberger, 1969).

BOUMEDIENE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

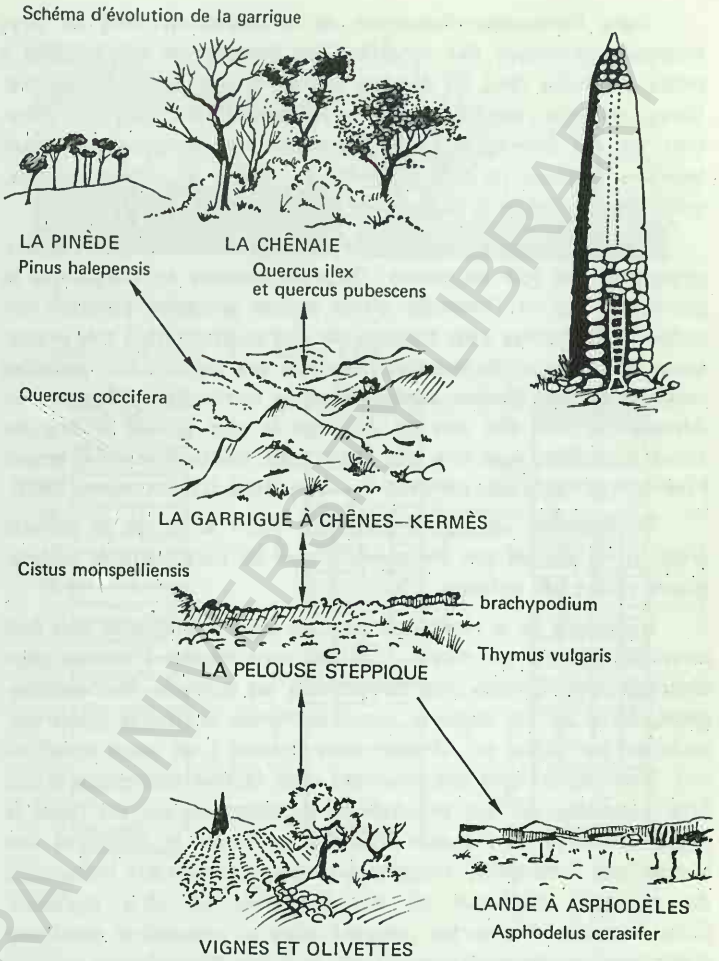


Figure 8.8
Les diverses étapes de la dégradation du couvert végétal en France méditerranéenne. La série régressive conduit de la forêt climacique de chênes pubescents ou d'yeuses à une lande dénudée à Asphodèles. La cheminée de verrier figurée sur ce dessin symbolise un des facteurs essentiels du déboisement de ces régions au Moyen-Age et sous l'ancien régime. D'après Kuhnholtz-Lordat in *Harant et Jarry "Guide du naturaliste dans la région méditerranéenne", Delachaux et Niestlé ed. 1967, tome I, p. 39*

Ici encore, la végétation climacique laisse la place à des pyrophytes. La strate herbacée graminéenne est constituée par des andropogonacées dont les bourgeons, abrités au cœur de touffes denses, sont protégés lors du passage du feu, ou par des espèces rhizomateuses telles les *Imperata* et les *Chrysopogon.* Il en est de même de la strate arbustive, tandis que la strate arborée est surtout constituée par des végétaux au tronc recouvert par une épaisse écorce résistant au passage des flammes. Ces arbres, très clairsemés, sont souvent en mauvais état, avec un tronc tortueux, conséquence directe des incendies répétées.

Les effets des feux de savanes sur la fertilité des sols dans les régions tropicales demeurent sujet à controverse. De façon générale, ils déterminent un appauvrissement du potentiel productif des sols ; cependant, des travaux effectués dans le Veld, en Afrique du Sud, suggèrent qu'ils accroissent leur richesse en éléments nutritifs, et qu'ils favorisent la constitution d'un tapis graminéen à *Themeda* très recherché par les ongulés sauvages ou domestiques.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dans l'ensemble, l'incendie de la végétation dans les pays tropicaux provoque des modifications écologiques comparables à celles observées dans les régions méditerranéennes : perte de matières carbonées, solubilisation massive des éléments nutritifs, élévation du pH par suite de la formation de composés minéraux basiques à partir de sels de métaux alcalins et alcalino-terreux, enfin diminution de la capacité de rétention d'eau des sols.

Dans l'ensemble, les feux de brousse déterminent un appauvrissement des sols en humus. On a pu montrer au Kenya que la protection contre l'incendie d'une savane arbustive pendant dix années consécutives s'est traduite par une augmentation très importante de son taux de matières humiques par rapport aux parcelles voisines brûlées chaque année. D'autres recherches effectuées en Afrique du Sud ont mis en évidence la plus grande aridité des zones incendiées avec une très importante fluctuation de la teneur hydrique de leurs sols pendant la saison sèche (Daubenmire, 1968).

Si l'incendie est allumé assez tôt avant la fin de la période aride, il ne semble pas en revanche que les perturbations pédologiques soient très néfastes.

L'incendie de la végétation dans les régions tropicales doit être considéré comme un moyen d'action dont dispose l'homme pour aménager des habitats plus favorables à ses activités. Malheureusement, force est de déplorer que d'immenses territoires intertropicaux, en particulier en Afrique, sont exposés à un usage abusif du feu. L'utilisation sans discernement d'un facteur écologique d'une telle puissance par les populations autochtones, qui est hélas la règle, effectuée sans aucun souci de préserver la pérennité des biocœnoses incendiées, conduit à un appauvrissement inéluctable du potentiel productif de ces dernières. La série régressive *sylva* → *saltus* → *desertus* présente alors la probabilité maximale d'atteindre son terme ultime.

ALTERATION PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS

L'agriculture abusive constitue aussi un puissant facteur de destruction des ressources naturelles.

L'altération des sols par le sel

Le mauvais usage de l'eau, la mise en culture intempestive de terres marginales ont conduit en bien des régions à des altérations chimiques irréversibles de la structure des sols. Depuis des temps immémoriaux, l'irrigation de terres salées fut le fléau de bien des civilisations. Dans les pays à climat aride, le mauvais drainage des cultures ou la proximité de la nappe phréatique jointe à la forte évapotranspiration ont conduit à une accumulation des sels dans les

SOUTHEAST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

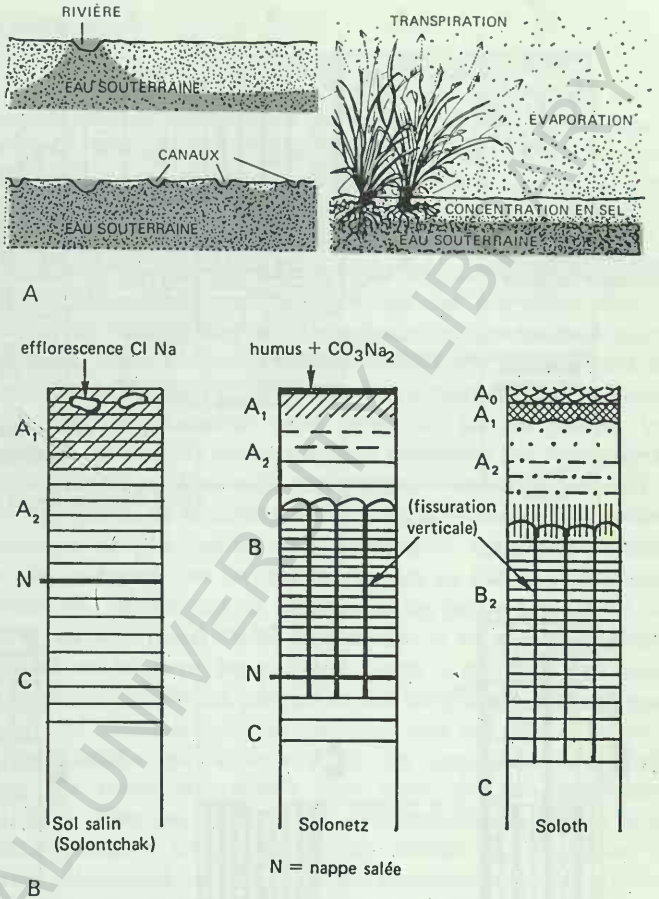
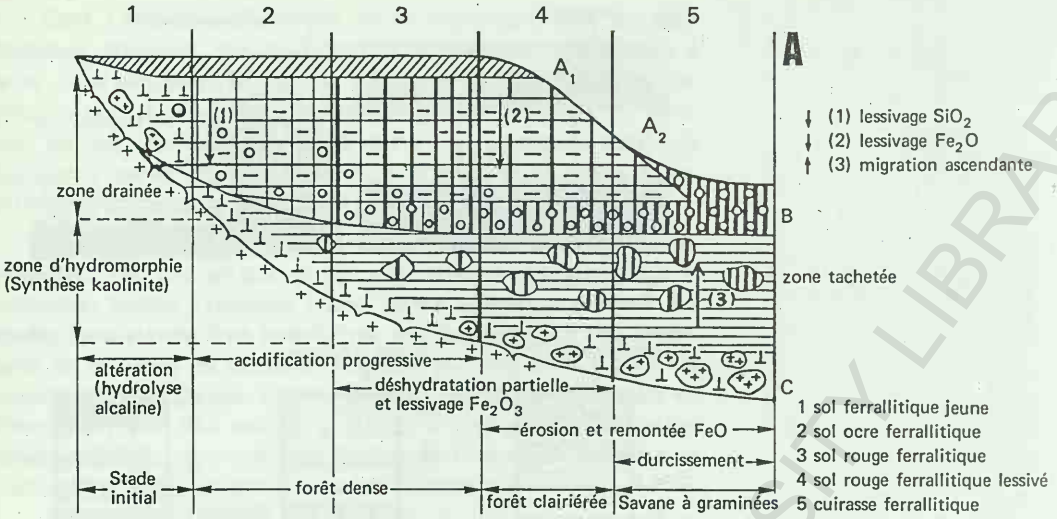
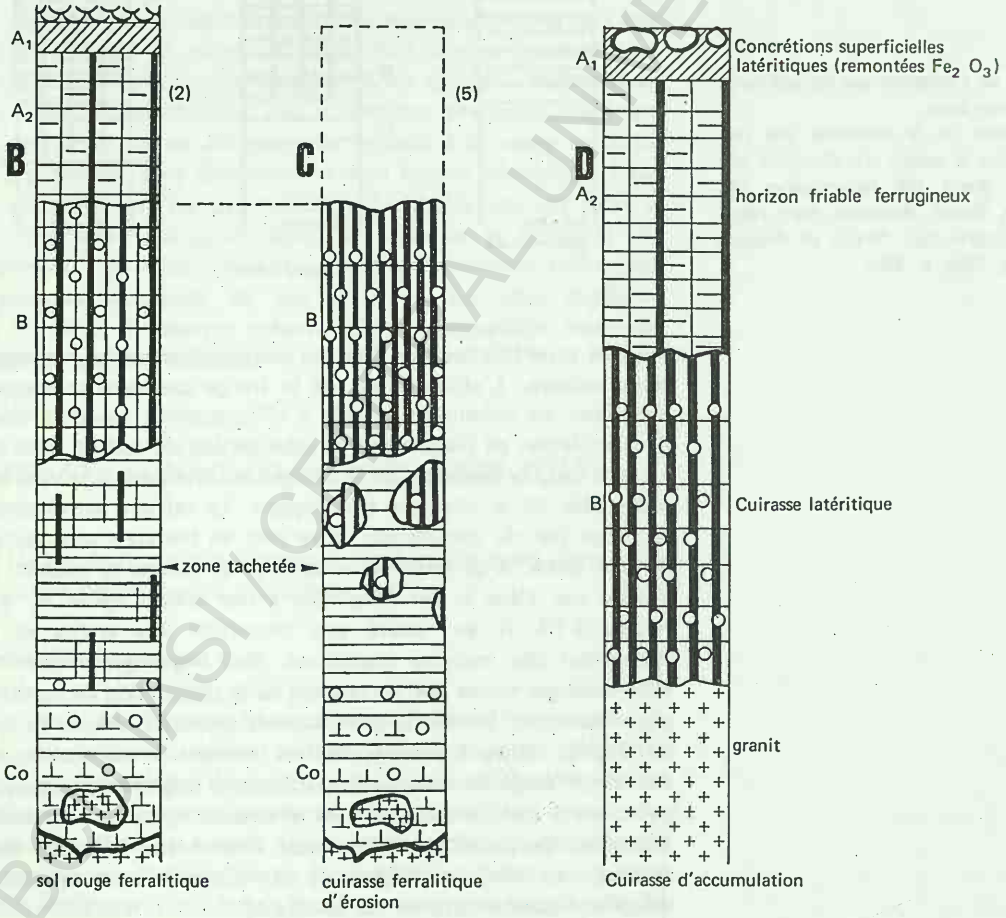


Figure 8.9
Effets néfastes de l'irrigation sur les sols halomorphes en climat aride.
A — Mécanismes de la remontée des sels (explications dans le texte). B — Structure pédologique des divers sols halomorphes (A, d'après Revelle, Scient. American, sept. 1963 — B, d'après Duchaufour "Précis de Pédologie" Masson ed., 1965, p. 351)

couches superficielles (fig. 8.9) des sols qui deviennent impropres à toute culture. L'affleurement de la frange capillaire provoque la formation de *solontchacks,* sols à efflorescences blanches dues à l'accumulation de plaques salines (phénomène du salant). Mais dans certains cas, le lessivage dû à l'irrigation provoque une altération irréversible de la structure pédologique. Le calcium est éliminé et remplacé par du sodium qui migre vers les horizons supérieurs en période sèche. Il se forme de la sorte du carbonate de sodium, très alcalin, qui élève le pH édaphique à des valeurs égales ou supérieures à 10. Il en résulte une dispersion des argiles et une dissolution des matières organiques. Peu à peu apparaissent des efflorescences noires qui témoignent de la destruction du complexe argilo-humique. De tels sols, dénommés *solonetz,* ont perdu toute fertilité et doivent être considérés comme irrécupérables. Au Pakistan, l'usage de mauvaises techniques d'irrigation a transformé en solonetz plus de deux millions d'hectares au cours des dernières décennies. Ce phénomène s'est aussi observé aux Indes, en Mésopotamie, au Mali, en Algérie et aux Etats-Unis où un hectare irrigué sur deux est atteint par ce fléau.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY





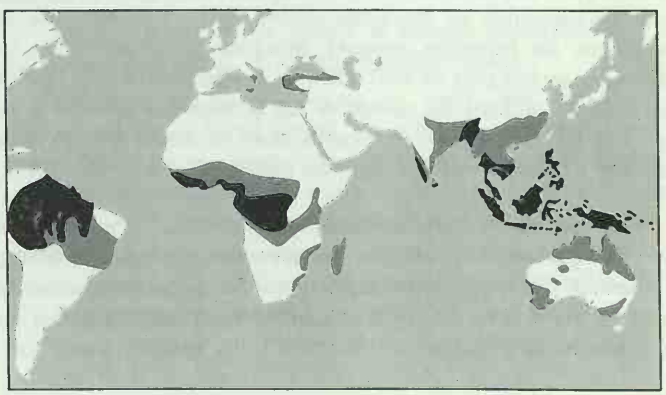
BIBLIOTECA CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Figure 8.10
Les diverses étapes de la dégradation des sols ferralitiques (latéritisation)
A – Transect montrant les stades successifs qui marquent le cheminement depuis un sol ferralitique jeune jusqu'à la constitution d'une cuirasse latéritique stérile par suite du déboisement. B – Structure pédologique d'un sol ferralitique sous forêt dense ombrophile, C – d'une cuirasse latéritique d'érosion, D – d'une cuirasse latéritique d'accumulation. D'après Duchaufour, "Précis de pédologie", Masson éd., 1965, p. 70-1 mais modifié

La latéritisation

La latéritisation constitue dans les régions tropicales un sérieux obstacle au défrichement des forêts ombrophiles ; elle résulte des effets conjugués des fortes températures et d'une abondante pluviométrie. Les sols latéritiques sont caractérisés par la présence d'une forte teneur en fer et en alumine, une réaction acide et une faible concentration en silice. Ils sont de couleur rouge ou jaune, ce qui atteste de leur richesse en oxydes ferriques et en aluminium. Une coupe verticale pratiquée dans un sol latéritique met en évidence un horizon supérieur ferrugineux, très pauvre en matières organiques, dont la silice et les éléments nutritifs minéraux ont été enlevés par le lessivage et au-dessous un horizon poreux, également latéritique, qui a permis cette migration par sa texture très perméable. Si la forêt ou la végétation secondaire qui l'a remplacée sont détruites pour être mises en culture, l'exposition au soleil et aux intempéries de la surface du sol le transforme en une cuirasse latéritique, dont la couleur et la consistance rappellent la brique, soit par migration des oxydes de fer vers les horizons supérieurs, soit par décapage du fait de l'érosion de ces derniers (fig. 8.10). En réalité, les luxuriantes forêts ombrophiles et les savanes tropicales croissent sur les terres les plus infertiles de la planète. Ce paradoxe est le fruit d'une longue adaptation qui permet un recyclage quasi parfait des éléments biogènes contenus dans la litière et la mince couche humique qui recouvre le sol. On constate l'exacte coïncidence des forêts ombrophiles avec celles des sols ferralitiques (fig. 8.11). Dans ces conditions, le défrichement des biomes forestiers tropicaux a bien souvent pour résultat de transformer en régions désertiques et dénudées des territoires étendus autrefois couverts par des forêts denses. Au Ghana, au Dahomey, au nord du Nigéria, la cuirasse latéritique recouvre aujourd'hui des centaines de milliers de km^2, surmontés par endroits d'un mince placage de sol dispersé entre les affleurements d'hématite ou de bauxite, stade ultime de la transformation des terres latéritiques.

Figure 8.11
Distribution des sols ferralitiques dans le monde. Remarquer la rigoureuse superposition de ces formations pédologiques avec les territoires occupés par des forêts ombrophiles tropicales (hachures). D'après Mac Neil, Scient. American, nov. 1964



BOUIA CENTER LIBRARY

Bien que la structure physico-chimique des sols paraisse plus stable dans les régions tempérées, ces derniers ne sont cependant pas à l'abri de toute altération consécutive à une mauvaise exploitation. Dans les sols forestiers, en particulier, le lessivage et l'acidification excessive des horizons supérieurs conduit à leur podzolisation. Celle-ci se traduit par une dégradation des minéraux et argiles qu'ils contiennent sous l'influence d'un humus grossier à décomposition lente (mor). Cette perte de fertilité est parfois très rapide sous les conifères dont la litière est assez acide et riche en lignine, tanins et autres substances organiques à transformation lente. C'est sous cet aspect que doit être jugée la politique forestière actuelle qui tend à substituer systématiquement les résineux aux feuillus.

L'érosion des sols

L'action conjuguée du déboisement par la hache ou le feu, du surpâturage et d'une mauvaise utilisation des terres de culture provoque une érosion des sols. Très lente dans les conditions naturelles en pays au relief accentué et quasi nulle en plaine, celle-ci est bien souvent accélérée par l'action de l'homme.

Dès la fin du Néolithique, d'immenses contrées tant au Proche-Orient qu'en Chine avaient déjà été ruinées par la mise en culture de terres fragiles ou par leur mauvaise utilisation agricole.

L'érosion des sols est le fait de deux facteurs géologiques distincts : l'eau et le vent.

L'érosion éolienne est très importante dans les pays steppiques dont les sols sont de texture sablonneuse ou constitués par de fines alluvions. Elle a ravagé de vastes territoires en Asie, dans le bassin méditerranéen et en Amérique du Nord, en particulier dans l'ouest des Etats-Unis. La destruction des sols sur d'immenses surfaces situées dans le Texas, l'Oklahoma, la partie orientale du Colorado et les deux Dakota a fait suite à brève échéance au défrichement de la prairie (fig. 8.12). Des périodes de sécheresse prolongée provoquèrent une érosion éolienne accélérée dans ces fameux *dust bowl,* en particulier au cours des années 30. Lors de tornades, des tourbillons de poussière prenant naissance dans des zones qui couvraient parfois plus de 450 000 km^2 transportaient vers l'est des centaines de millions de tonnes de sol et laissaient la roche à nu. Bien des *bad lands* nord-américaines sont en réalité le fruit d'une mauvaise utilisation des terres par les colons européens (fig. 8.13).

Les méfaits de l'érosion hydrique sont encore plus répandus. Elle conjugue ses effets, en bien des pays, avec ceux du surpâturage et amenuise peu à peu la productivité des terres. La destruction des forêts de pente dans les régions au relief tourmenté constitue une cause essentielle d'érosion des sols.

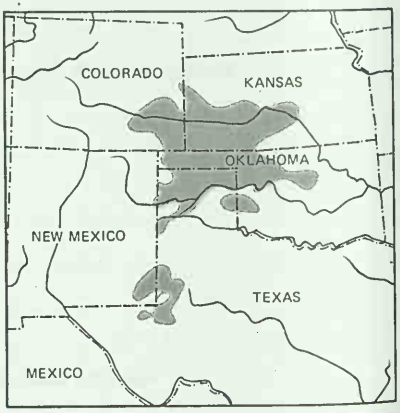


Figure 8.12
Localisation des principaux "Dust Bowl" aux Etats-Unis. Dans les plaines steppiques de l'Ouest, l'existence simultanée de conditions climatiques semi-arides, avec sècheresse estivale prolongée et de sols fragiles, à texture très fine, a permis à l'érosion éolienne d'exercer ses méfaits. Après mise en culture de ces steppes, le vent entraîne dans l'air des millions de tonnes de terre, d'où le terme de dust-bowl donné aux territoires atteints par ce fléau. D'après U S D A, soil conservation service

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

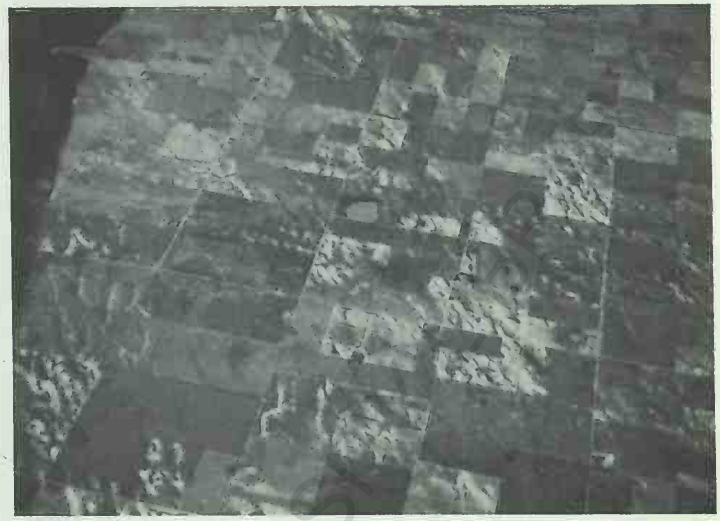


Figure 8.13
Vue aérienne de sols en proie à l'érosion éolienne dans le Colorado. On remarque des bandes de couleur claire dont la direction générale est perpendiculaire à celle des vents dominants. Elles correspondent à des territoires dont les couches superficielles ont été érodées (Cliché F. Ramade)

Le pouvoir régulateur du couvert végétal sur le régime hydrique n'est plus à démontrer. Il était d'ailleurs déjà connu des Grecs de la période classique plusieurs siècles avant le début de notre ère comme en atteste ce texte de Platon, dans "Critias" : *"en ce temps-là, le pays était encore intact, les plaines pierreuses de l'Attique étaient remplies de terre grasse ; il y avait sur les montagnes de grandes forêts, dont il reste encore aujourd'hui les témoignages visibles. Si, en effet, parmi les montagnes, il en est qui ne nourrissent plus que des abeilles, il n'y a pas bien longtemps qu'on y coupait des arbres propres à couvrir les plus vastes constructions dont les poutres existent encore. Il y avait beaucoup de grands arbres... et le sol... recueillait les pluies annuelles de Zeus et ne perdait pas comme aujourd'hui l'eau qui s'écoule de la terre dénudée vers la mer, et, comme la terre était épaisse et recevait l'eau dans son sein, la tenant en réserve dans l'argile perméable, elle laissait échapper dans les creux l'eau des hauteurs qu'elle avait absorbée et alimentait en tous lieux d'abondantes sources et de grosses rivières".*(1)

On ne saurait mieux décrire le pouvoir régulateur des forêts sur le cycle de l'eau et les méfaits du déboisement.

L'érosion des sols est nulle en forêt, très faible sur des prairies, même en fortes pentes. En effet, la végétation freine les gouttes de pluie qui perdent leur énergie cinétique et arrivent au sol à très faible vitesse. En outre, la litière et le tapis de mousse qui recouvrent la terre jouent le rôle d'éponge. Un kg de mousses sèches est capable d'absorber 5 l d'eau. Un hectare de forêt méditerranéenne retient 400 m^3 d'eau après un violent orage. Celle-ci sera en partie évapotranspirée, le reste s'infiltrera lentement et sera peu à peu restitué aux nappes phréatiques tandis que le ruissellement sera nul.

(1) Traduction Emile Chambry, Garnier-Flammarion, 1969, p. 483 (dans Lieutaghi, 1972).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITARA

Au contraire, la destruction de la forêt se traduira par une érosion accélérée due à la violence des impacts des gouttes de pluie sur la terre dénudée et au ruissellement intense.

Le surpâturage aggrave souvent les effets de la déforestation, il représente une cause d'érosion intense dans les zones de prairies naturelles (steppes, alpages). Le surpâturage détermine un appauvrissement du couvert végétal et de profondes modifications qualitatives dans sa composition floristique. A long terme, c'est un puissant facteur d'érosion des sols. Les plantes préférées par les herbivores domestiques n'ont plus le temps de croître si la densité animale est trop forte. A cela se surajoute la destruction des végétaux vivaces au détriment de la stabilité des terres car les annuelles qui les remplacent ont un enracinement moins profond. Le broutage préférentiel de certaines plantes s'accompagne aussi de l'envahissement des terrains de parcours du bétail par les végétaux qu'il dédaigne. C'est ainsi que l'on remarque la prolifération des *Rumex* dans les alpages et celle des *Eryngium* dans les prairies naturelles méridionales, lieux de pacage des moutons.

Il semble par ailleurs que l'extension des tapis graminéens discontinus causée par le surpâturage crée des conditions écologiques favorables aux proliférations de petits rongeurs terricoles et de criquets migrateurs.

En sus du broutage trop intense, le piétinement consécutif à de trop fortes densités d'animaux domestiques saccage la végétation le long des pistes de déplacement des troupeaux, autour des points d'eau et dans les corrals. A partir de ces zones vulnérables s'installe un ravinement catastrophique qui gagne peu à peu les terrains avoisinants. Ainsi, dans les pays de steppes aux terres fragiles s'observent de nos jours de véritables ravins profonds de plusieurs mètres à l'emplacement d'anciens sentiers empruntés par le bétail (dans Dorst, 1965).

Les pays méditerranéens figurent parmi les plus anciennes victimes du surpâturage. La péninsule ibérique, la France méditerranéenne, l'Italie centrale et méridionale, les Balkans, l'Afrique septentrionale et le Proche-Orient portent les stigmates de la mauvaise utilisation du *Saltus* et de son extension à des zones dont il aurait fallu préserver le couvert forestier avec la plus grande rigueur.

Même dans notre pays l'érosion des sols est plus intense que l'on ne pourrait le penser : plus de 4,5 millions d'hectares, situés en majorité au sud d'une diagonale Modane-Andorre, présentent des signes très nets d'altération, dont 500 000 hectares sous l'effet du vent, le reste du fait de l'érosion hydrique (Hénin, 1967). Comme en bien d'autres régions du monde, les ovins et parfois les caprins ont joué un rôle déterminant dans ce processus qui a ruiné de vastes terroirs sur le versant oriental du Massif Central, dans les Cévennes, les Pyrénées orientales, les Alpes de Haute-Provence et le Dauphiné. Dans ces régions, bien des flancs de montagnes autrefois couverts de forêts profondes sont aujourd'hui dénudés par l'érosion

BOULDER / GETTY CENTER UNIVERSITY LIBRARY

Figure 8.14
Erosion des sols sur les rives du lac artificiel de Serre-Ponçon dans les Hautes-Alpes. Ce barrage hydroélectrique est implanté dans une région de France des plus exposées à l'érosion des sols. On voit sur ce cliché les stigmates du surpâturage et du déboisement sur les flancs de montagne du bassin versant, au second plan. Rien n'a été fait pour mettre en œuvre l'indispensable programme de reboisement et de restauration des sols qui s'imposait pour protéger cette vaste retenue d'un rapide comblement. Celle-ci perd actuellement chaque année 3 x 10^6 m^3 de capacité par suite de l'apport des matériaux alluviaux entraînés par l'érosion. Si rien n'est entrepris, la durée d'utilisation de l'ouvrage pourrait être moitié moindre que celle initialement prévue. (Cliché F. Ramade)

qui laisse apparaître le substrat rocheux. Les environs de Digne, les rives du lac artificiel de Serre-Ponçon dans les Hautes-Alpes offrent aujourd'hui un témoignage spectaculaire des méfaits du surpâturage et du déboisement (fig. 8.14).

Il existe en réalité pour chaque biotope une capacité limite à l'égard de son utilisation pastorale. Celle-ci se définit comme la densité maximale d'herbivores qu'il peut supporter sans risque de dégradation. Celle-ci s'exprime en unité-mouton (un bovin = un équidé = 5 moutons ou chèvres), ou en biomasse (en kg/ha). Le tableau LXV figure la capacité limite de divers pâturages en diverses régions du monde.

En réalité, diverses incitations économiques ou une pression démographique exagérée font de nos jours systématiquement omettre aux éleveurs cette notion de capacité limite que l'on ne peut dépasser sans compromettre la productivité des prairies naturelles ou des herbages.

Tableau LXV — Capacité limite de divers pâturages de régions tempérées ou tropicales (d'après divers auteurs dans Dorst, 1965)

Pâturages naturels	*Charge en kg/ha*
Pampa argentine	140
Prairie du Texas	110
High-veld sud-africain	85
Savane à *Themeda*, Kenya	40
Pâturages artificiels	
Kivu, Congo	650
Prairie, Belgique	480
Ituri, Congo	340
Kwango, Congo	55
"*Range*", Oklahoma	36

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Aux Etats-Unis, la capacité limite des territoires situés à l'ouest du Mississipi était de 112,5 millions d'unités-mouton aux débuts de la colonisation. En 1930, l'érosion l'avait réduite à 54 millions d'unités, mais ces territoires en comportaient alors encore au moins 86,5 millions et étaient donc soumis à une surcharge évidente. De même, on dénombrait en Iran quelque 66 millions d'unités-mouton en 1960 alors que la capacité limite des pâturages de ce pays était de 26 millions (Dorst, 1965).

En Amérique du Sud, en Afrique tropicale et *a fortiori* aux Indes, le surpâturage atteint en bien des contrées des proportions désastreuses. Quand on songe à ses effets inéluctables sur les terres ainsi surexploitées, on ne peut s'empêcher d'éprouver quelque anxiété pour l'avenir des populations de ces pays d'ici la fin du siècle compte tenu des performances démographiques qui sont les leurs.

Plus encore que le surpâturage, le défrichement de terres marginales ou la mauvaise utilisation agricole de terrains de pentes peuvent être la cause d'érosion accélérée. Tel est le cas des steppes occidentales des Etats-Unis, entre le Mississipi et les Rocheuses, qui ont été ravagées par l'érosion éolienne et hydrique à la suite de leur mise en culture. On estimait en 1950 que 120 millions d'hectares présentaient des signes d'érosion pour une superficie cultivable totale de 186 millions d'hectares (Tableau LXVI).

Tableau LXVI — Réduction des terres cultivables du fait de l'érosion des sols aux Etats-Unis (d'après Bennett dans Bloemers, 1956)

Terrains devenus complètement stériles	20×10^6 ha
Terrains presque complètement dégradés	20×10^6 ha
Terrains dont 50 % de la couche arable a été enlevée par l'érosion	40×10^6 ha
Terrains présentant un début d'érosion	40×10^6 ha
	120×10^6 ha

De toutes les cultures, celles des plantes sarclées (maïs, pommes de terre, par exemple) sont les plus dangereuses pour les terres fragiles car elles laissent le sol à nu, ce qui favorise la prise du vent et le ruissellement superficiel.

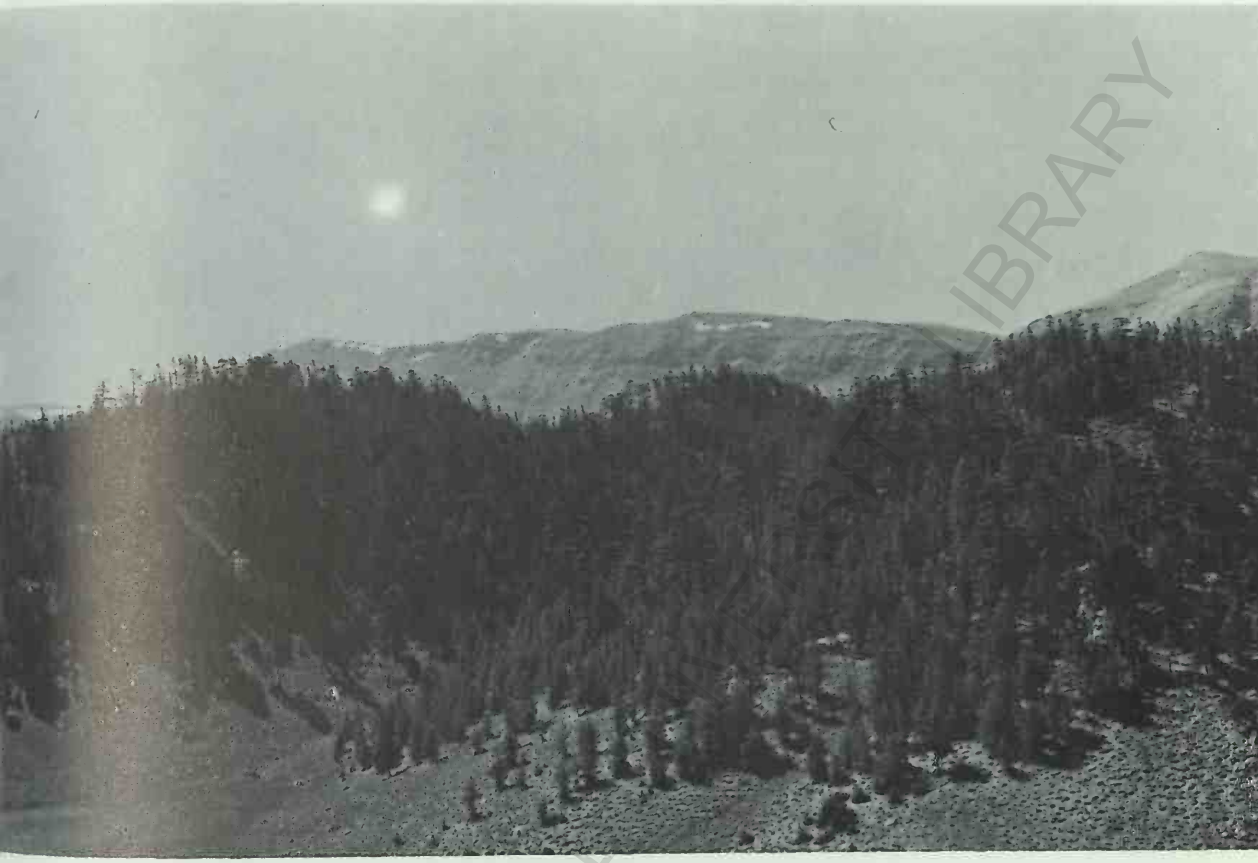
L'influence catastrophique de l'utilisation agricole sur la pérennité de certains sols est démontrée par la comparaison entre les pertes par érosion de zones forestières et de parcelles voisines récemment défrichées. En 1956, la forêt secondaire d'Adiopodoumé, en Côte d'Ivoire, a perdu 2 t/ha de terre alors qu'au même lieu, une zone défrichée cultivée en manioc perdait 92,8 t de sol par hectare ! En 1955, à Sefa (Sénégal), l'érosion sous forêt sèche se chiffrait à 0,02 t/ha alors que les terres voisines plantées en arachide perdaient 14,9 t/ha soit 300 fois plus chaque année (Aubert, Fournier et Rozanov, 1968).

Au total, 20 millions de km^2 soit 28 % des terres cultivables du monde ont été détruits par l'érosion en un siècle !

Planche XXIII
Surpâturage et déforestation en Turquie
1) Le Massif du Taurus abrite les principaux peuplements de cèdres du Liban qui subsistent encore de nos jours. Ces boisements sont cependant menacés d'anéantissement par la pratique du pâturage en forêt, fléau de tous les pays méditerranéens. Le piétinement consécutif du sous-bois interdit toute régénération ultérieure. On remarque par ailleurs de nets indices de surpâturage dans les pelouses situées au premier plan du cliché.
2) Erosion des sols en Anatolie centrale à la suite d'une surcharge des terrains de parcours (clichés C. Chararas)

Planche XXIV (au verso)
1) Erosion des sols à Madagascar. Les "lavakas", phénomènes d'érosion les plus accentués, ravagent peu à peu les plateaux malgaches où seuls subsistent encore quelques lambeaux de végétation arborescente alors que ces régions étaient jadis recouvertes d'un dense manteau forestier. Les "lavakas" résultent de l'arrachage par pans entiers des flancs des montagnes sous l'effet du ravinement (cliché Humbert)
2) Vergers en terrasses en Catalogne méridionale (Province de Valence, Espagne) (cliché F. Ramade)
Les peuples de méditerranée septentrionale ont appris dès la plus haute antiquité à stabiliser les sols en pente par la construction de terrasses afin de prévenir l'érosion.

BOLLES CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



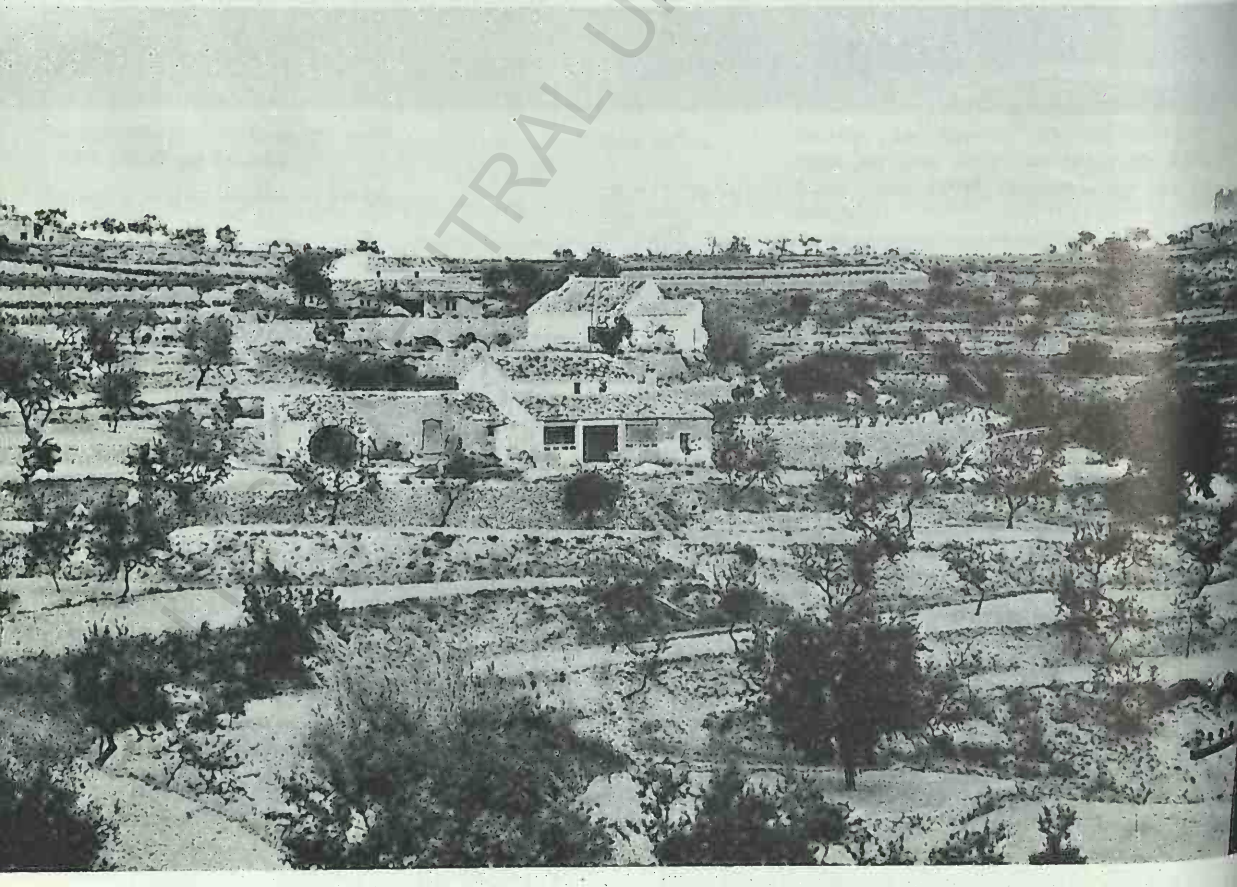
1

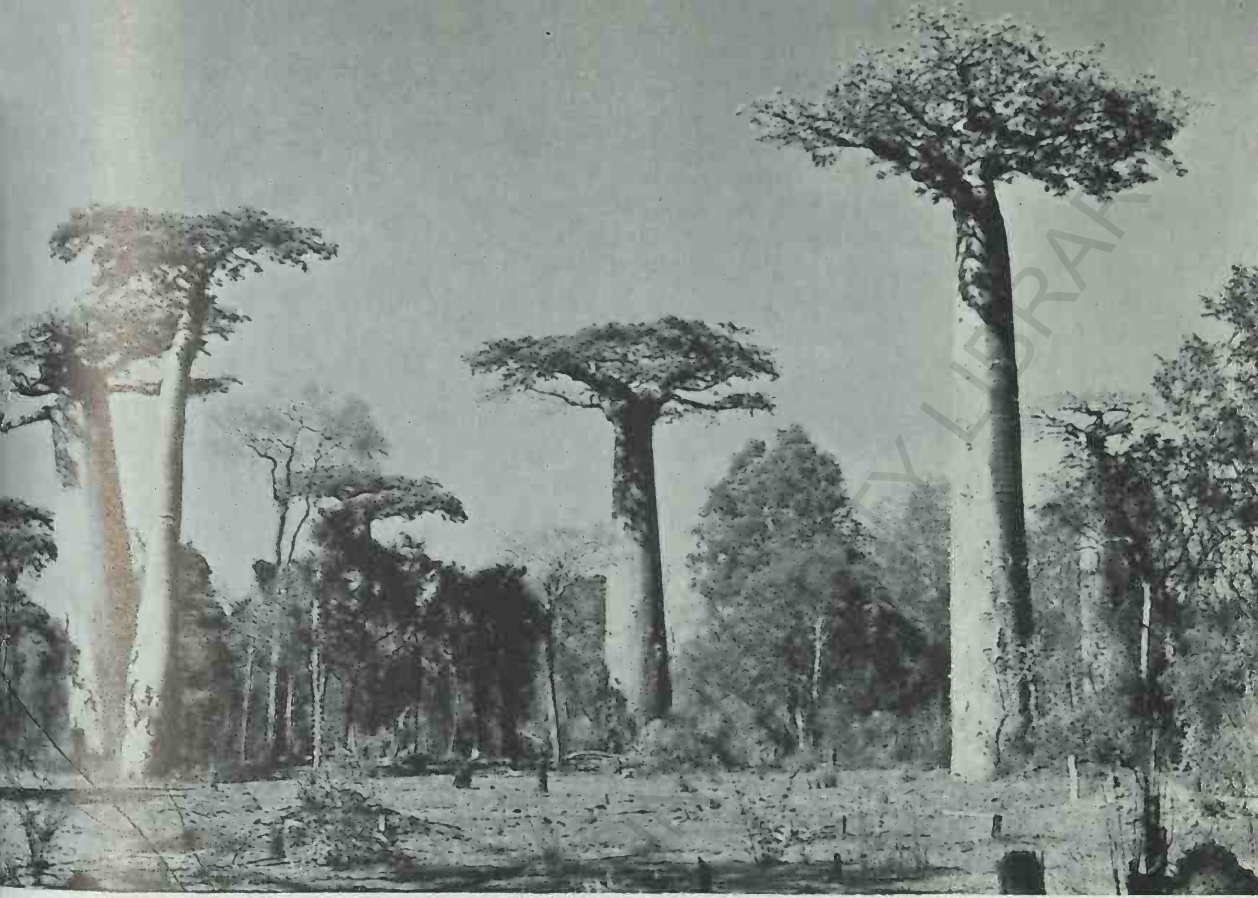
2

BCU CENTRAL LIBRARY

1

2



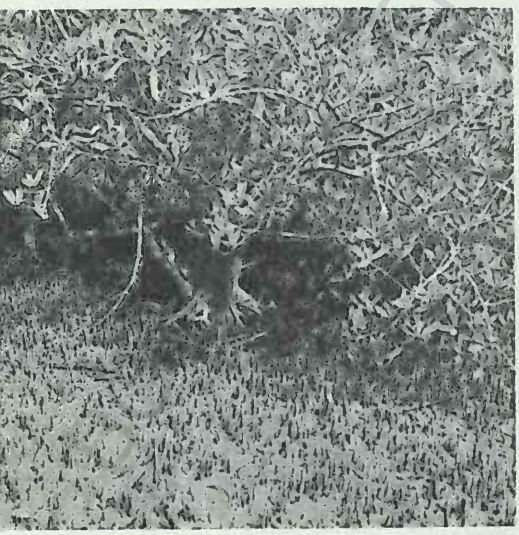


1

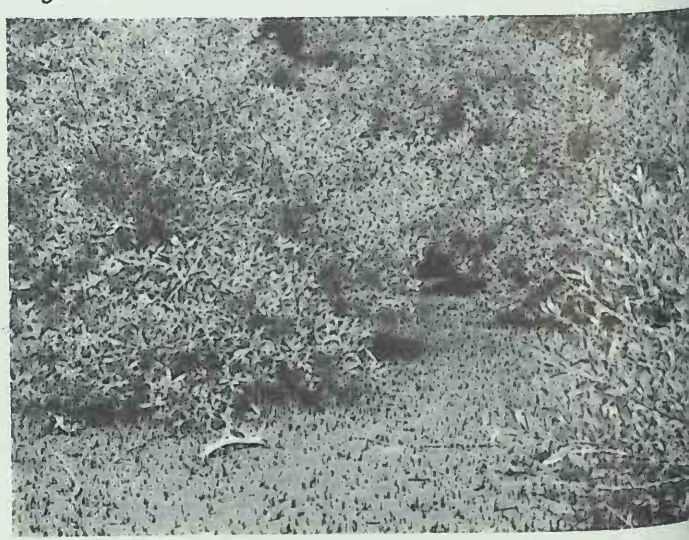
2

1

2



3



CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Mais quelle que soit l'immensité des dommages infligés à la végétation et aux sols par une surexploitation irraisonnée, celle-ci ne présente pas l'ampleur des destructions qu'a subie la vie animale du fait de l'homme depuis les temps les plus reculés.

Ces dernières furent le résultat de trois processus distincts : la disparition des biotopes auxquels étaient inféodés certaines espèces, la chasse, enfin la modification de la concurrence interspécifique due à l'introduction d'espèces originaires de pays fort éloignés et parfois d'autres continents, phénomène plus récent mais dont les conséquences furent parfois catastrophiques pour bien des espèces endémiques moins bien adaptées que leurs concurrents amenés par l'homme.

Planche XXV (au recto)
Régression des forêts malgaches. L'extension des cultures industrielles d'une plante textile, de sisal, constitue une grave menace pour les boisements autochtones du sud-ouest de la Grande Ile.
1) Défrichement des forêts tropophiles occidentales de baobabs (Andansonia madascariensis *et* Adansonia grandidieri). *Une vaste clairière a été créée pour mettre les sols en culture (au premier plan).*
2) Des Alluaudia procera, *vestiges de la végétation hautement endémique de Didiéracées, ont ici été utilisées pour constituer une haie autour d'une parcelle abandonnée de sisal dont on distingue quelques pieds au second plan.*
(clichés M. Keraudren – Aymonin)

Planche XXVI
Les zones humides : marais, lagunes côtières, mangroves, étangs, figurent parmi les plus diversifiés et les plus productifs des écosystèmes. Malheureusement, l'aversion atavique de l'homme à leur égard le pousse à les faire régresser sans cesse et, dans les pays industrialisés, à favoriser les opérations dites "d'aménagement"
1) Coucher de soleil sur un étang des Dombes, dans la région lyonnaise. (cliché P. Vallée)
2 et 3) Mangrove en Basse-Casamance. Les végétaux ici figurés sont des Avicennia. *Remarquer sur le cliché 2 le sommet des rhizophores ou racines-échasses.*
(cliché G. Lemée)

L'extermination des animaux terrestres

Les animaux terrestres furent les premières victimes d'une prédation insensée, mais depuis quelques décennies, les besoins croissants de l'humanité en protéines animales la conduisent à faire des prélèvements immodérés dans la faune océanique dont plusieurs espèces pourraient être décimées d'ici la fin du siècle.

En réalité, il est difficile de faire la part des divers facteurs de raréfaction qui sont intervenus dans la régression ou l'anéantissement pur et simple de telle ou telle espèce d'oiseau ou de mammifère.

Dans la plupart des cas, celle-ci résulte de la modification ou d'une destruction de leur habitat jointe à une pression de chasse excessive et parfois à l'introduction par l'homme d'espèces concurrentes.

La chasse constitue aujourd'hui le principal facteur de destruction des espèces continentales, en particulier en Europe et en Asie où la lenteur avec laquelle s'est faite la transformation des biotopes a permis à la plupart des vertébrés terrestres de s'adapter aux habitats modifiés par l'action de l'bomme.

Cependant, une pression de chasse exagérée avait conduit dès le Pléistocène à l'extermination de toute une série de grands mammifères survivants de l'exubérante faune tertiaire (fig. 8.15). Leur déclin a fidèlement suivi la colonisation des diverses terres émergées par l'espèce humaine.

C'est essentiellement à une chasse acharnée qu'est due la disparition des grands fissipèdes d'Eurasie. Le lion fut éliminé d'Europe dès le début de l'ère chrétienne et il n'occupe plus qu'un minuscule territoire dans la péninsule indienne (forêt de Gir) par

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

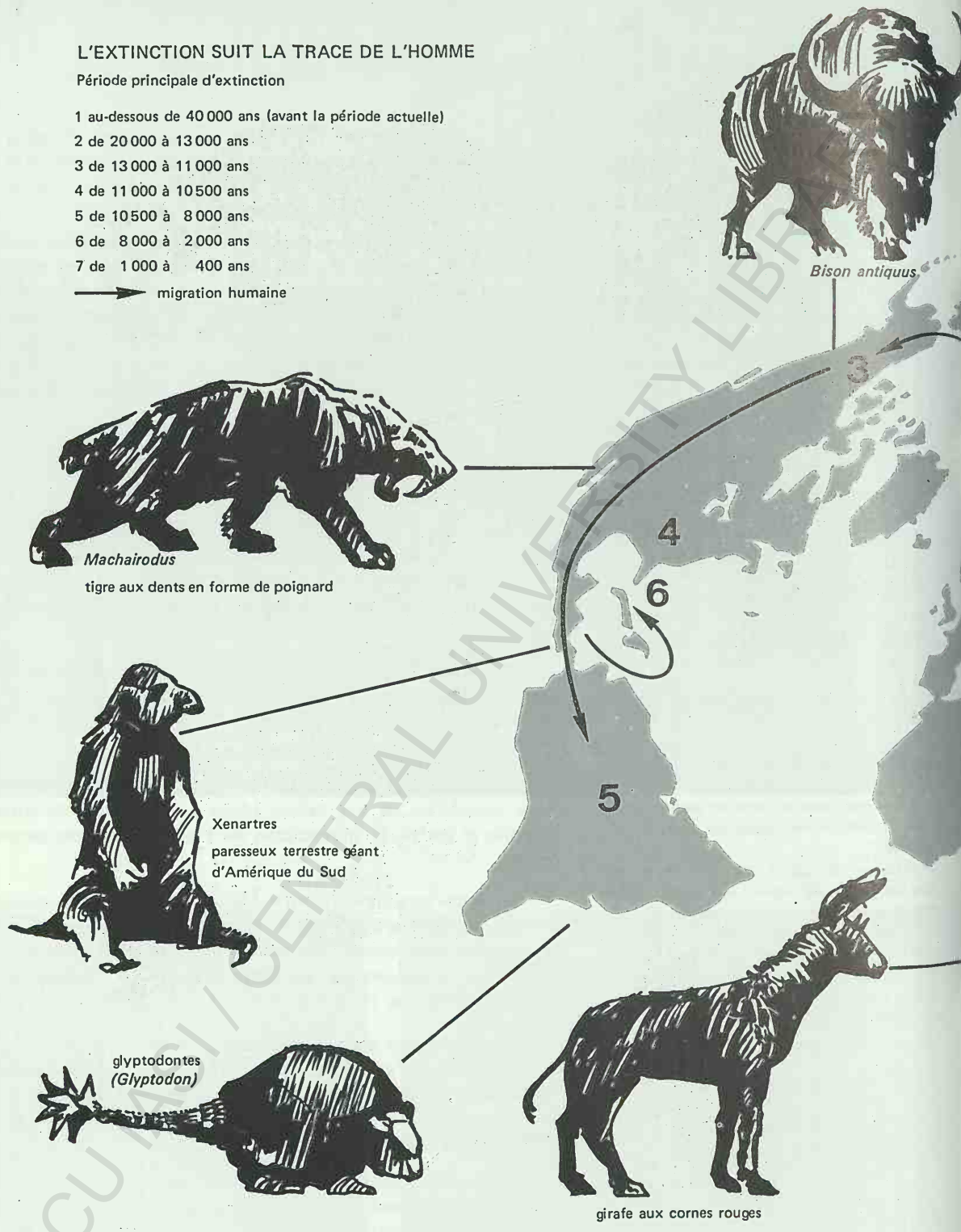
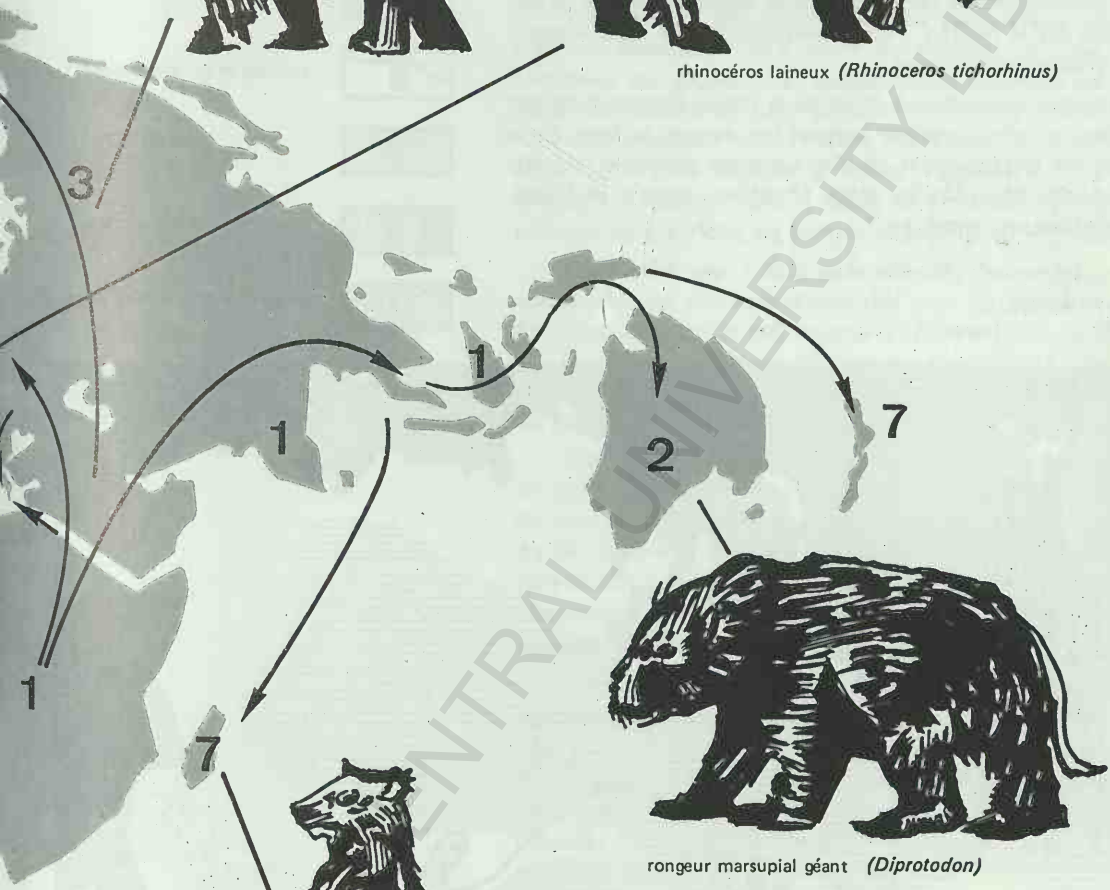


Figure 8.15
L'extermination de divers représentants de la grande faune Pléistocène. La disparition des espèces citées coïncide exactement avec la colonisation de leur aire de répartition par les chasseurs Paléolithiques. D'après Martin, Natural History, vol. 76, n° 10, Déc. 1967, p. 34-5

RCU MSU / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

mammouth *(Elephas primigenius)*

rhinocéros laineux *(Rhinoceros tichorhinus)*



rongeur marsupial géant *(Diprotodon)*

Lémuriens géants;
(Archeolemur, Hadropithecus)

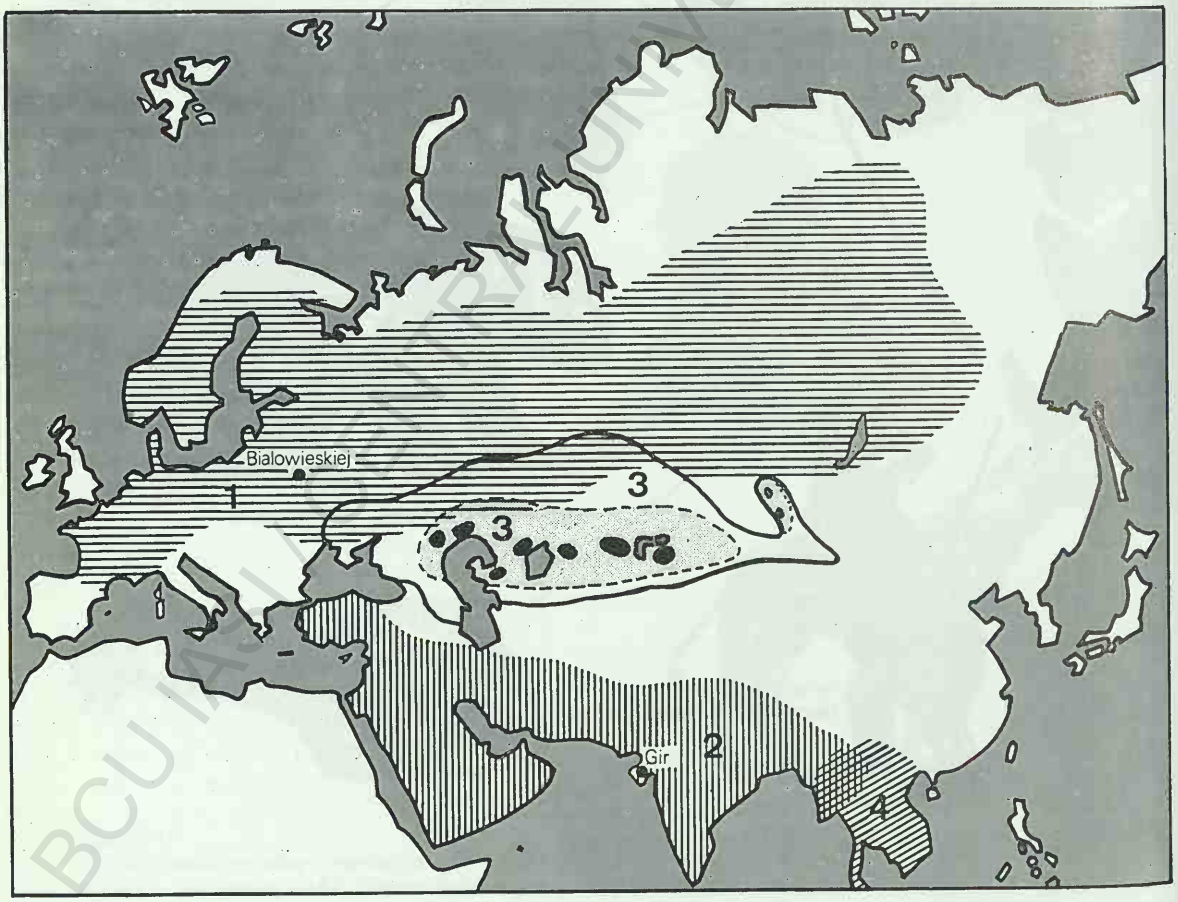
BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

rapport à l'immensité de son ancienne aire d'extension (fig. 8.16). L'ours a disparu des Alpes occidentales depuis le début du siècle ; quant au loup, les appâts empoisonnés ont permis son éradication complète de France et de bien d'autres pays d'Europe occidentale, quoique cette espèce soit encore bien représentée en Espagne et en Italie grâce à des mesures de protection.

A l'exception des carnivores précités dont l'élimination a résulté du danger potentiel qu'ils représentent pour l'homme et les animaux domestiques, le déclin des autres espèces animales du fait de la chasse est le résultat d'une surexploitation de leurs effectifs pour des mobiles économiques.

Le chasseur paléolithique tirait de la chasse l'essentiel de son alimentation, et elle constitue aujourd'hui encore la base de la subsistance des Esquimaux et de divers groupes ethniques primitifs dans les régions tropicales du globe (Pygmées, Indiens de l'Amazone, aborigènes australiens, etc.).

Figure 8.16
Régression des grandes espèces de Mammifères eurasiennes pendant la période historique : bison d'Europe, lion d'Asie, Antilope saïga, Rhinocéros unicorne.



BCU IAU LIBRARY UNIVERSITY LIBRARY

Toutefois, la plupart des hommes paléolithiques, dont ces ethnies représentent les derniers survivants, vivaient en étroite association avec le milieu. Si des groupes de chasseurs trop nombreux ont pu épuiser le gibier ou exterminer des espèces proches de l'extinction, les chasseurs prédateurs ont souvent su faire un judicieux usage des ressources de la faune.

LES GRANDS MASSACRES AU XIX^{ème} SIECLE.

L'hécatombe des oiseaux et des mammifères sauvages n'a vraiment commencé qu'à partir du moment où s'est établi un commerce des espèces non domestiquées. Favorisée par la découverte des poisons et celle des armes à feu, la chasse destinée à l'approvisionnement d'un marché en viande est une tout autre affaire que celle destinée à assurer l'alimentation de tribus de chasseurs-prédateurs. Elle a causé la perte de bien des espèces animales en Amérique, en Afrique et dans divers archipels.

C'est ainsi que furent anéanties de florissantes espèces qui comptaient des milliards d'individus dans les plaines centrales des Etats-Unis, comme le coq de prairie *(Tympanychus cupido cupido)* ou le pigeon migrateur *(Ectopistes migratorius).* Dans un cas comme dans l'autre étaient organisées des chasses commerciales de ces oiseaux afin d'en approvisionner les marchés des grandes villes.

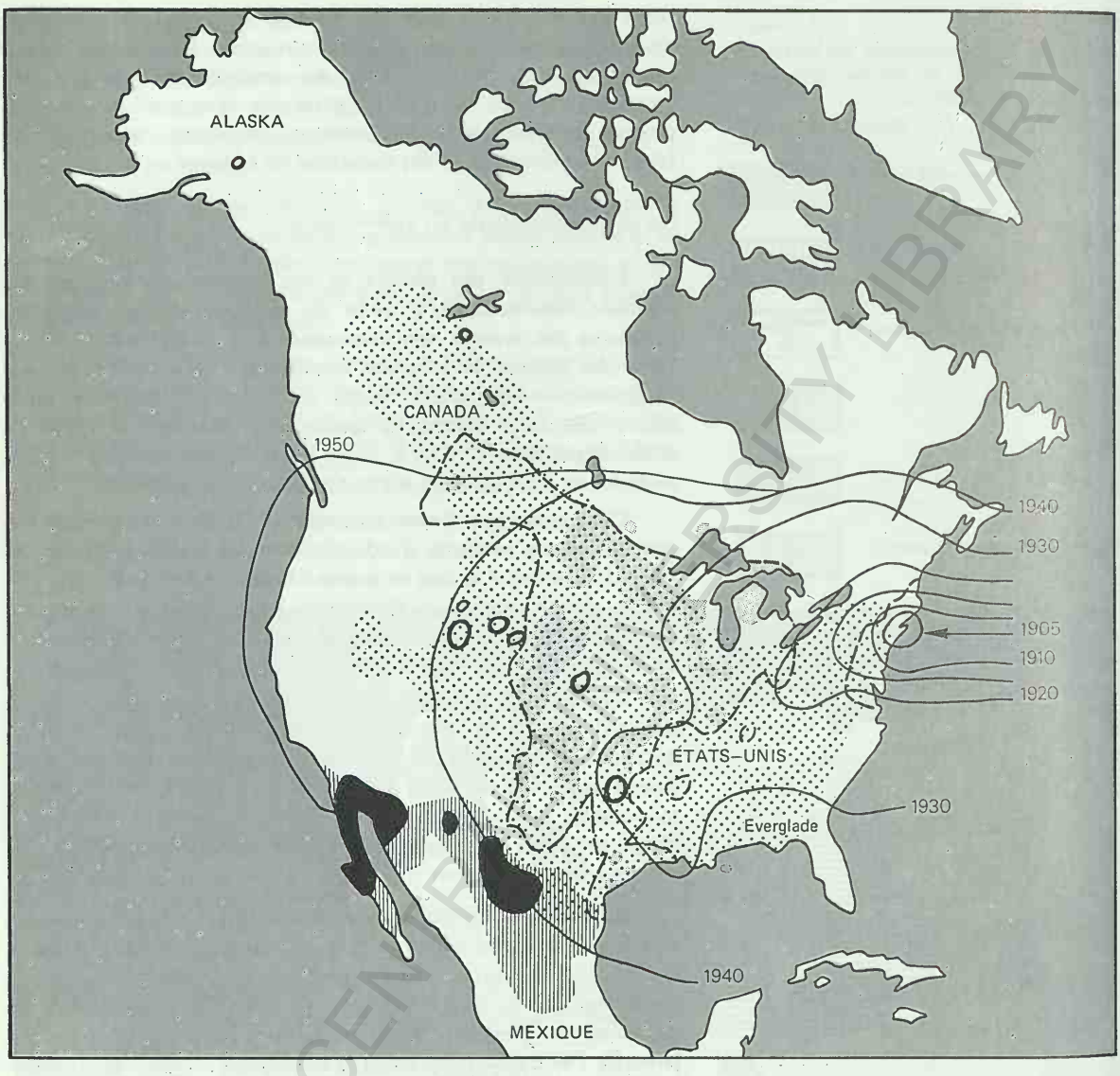
Bien qu'il ait bénéficié de mesures de protection dès le milieu du XIX^{e} siècle — on en comptait encore 2000 en 1916 — le déclin du coq de prairie oriental fut rapide à partir de cette date et le dernier spécimen de cette sous-espèce périt en 1932. Trois autres sous-espèces voisines subsistent encore en Amérique du Nord mais n'occupent plus que des territoires limités à l'intérieur de leur ancienne aire d'extension (fig. 8.17).

L'histoire de l'anéantissement du pigeon migrateur est encore plus édifiante. Cette espèce était si abondante au siècle dernier que l'on en dénombrait des vols comptant plus de deux milliards d'individus ! Elle nichait en colonies gigantesques dans les forêts de chênes des plaines du Nord et du Centre-Est. D'un naturel peu farouche (les Canadiens français le nommaient "tourte"), ce pigeon se laissait capturer sans difficulté (fig. 8.18).

En 1861, quelque 14 850 000 oiseaux furent tués et vendus à partir de la seule colonie de Petosky dans le Michigan sur les marchés de Chicago et New York (Wallace, 1963).

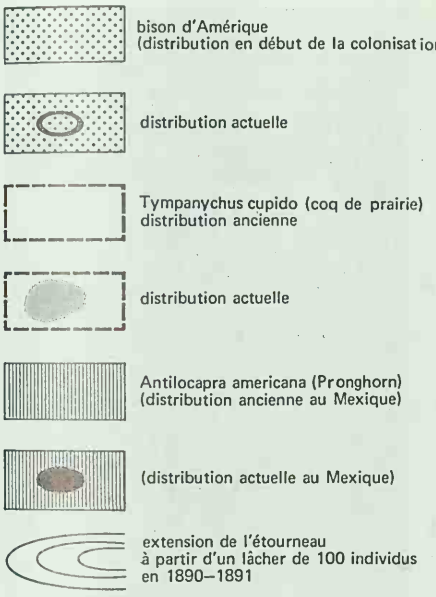
La destruction des forêts de chênes où nidifiait cette espèce, le massacre insensé auquel se livraient les chasseurs professionnels et la disparition consécutive des immenses vols qui constituaient sans doute le stimulus social nécessaire à sa reproduction déterminèrent son irréversible déclin. Malgré une tardive tentative pour la sauver de l'extinction, elle était trop raréfiée au début de ce siècle et rien ne pouvait arrêter son déclin inexorable. Le dernier pigeon migrateur périt en 1914 au zoo de Cincinnati.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY



L'extermination des bisons d'Amérique constitue, plus encore peut-être que dans le cas du pigeon migrateur, le plus consternant exemple du vandalisme humain. Il illustre aussi parfaitement les magnifiques résultats des mesures de protection lorsqu'elles sont prises et réalisées avec tout le discernement nécessaire.

Au début du XIX^{e} siècle, on estime qu'entre 60 et 100 millions de bisons peuplaient l'Amérique du Nord depuis le sud du Texas jusqu'aux frontières de l'Alaska. Il n'en subsistait plus que 541 dans tout ce continent quand en 1889, furent dénombrés les survivants du carnage, la plupart dans le Parc National de



← *Figure 8.17A*
Quelques exemples de perturbations biocoenotiques provoquées par les Européens en Amérique du Nord. D'après divers auteurs in *Cachan "L'écologie au service de l'homme et de la nature" Horizons de France ed., 1972, p. 160, mais modifié*

Yellowstone. La demande en viande et en cuir, la nécessité d'éliminer ces animaux pour mettre en culture les terres vierges et aussi le massacre organisé dans le but d'affamer les Indiens furent les principales motivations de cette hécatombe. Le célèbre "Buffalo Bill", recruté pour ravitailler un chantier de construction de voie ferrée, tua à lui seul 4 280 bisons en 18 mois (Dorst, 1965). La protection de cette espèce, votée par le Congrès en 1894, l'a sauvée d'un anéantissement inéluctable. Aujourd'hui, plus de 10 000 bisons vivent dans les parcs et réserves d'Amérique du Nord (Fitter, 1968). (fig. 8.17 B).

La faune d'ongulés africains a aussi beaucoup souffert de la chasse professionnelle destinée à fournir en viande les chantiers, les concessions minières, les grandes plantations et les marchés locaux.

Les plus grands dommages subis par les mammifères du fait de l'homme furent causés à la faune d'Afrique du Sud, colonisée dès le XVII^{e} siècle par les Européens. De remarquables espèces comme le Quagga et son proche parent, le zèbre de Burchell, furent exterminées par les Boers au début du siècle dernier, de même que l'hippotrague bleu *(Hippotragus leucophaeus)*, endémique de la région du Cap. D'autres antilopes comme les *Damaliscus dorcas* et *Damaliscus albifrons*, autrefois très abondantes dans toute l'Union, disparurent de la majeure partie de leur aire d'extension géographique.

CAUSES ACTUELLES DE DEFAUNATION

Le commerce de la fourrure constitue un important facteur de raréfaction de bien des espèces mammaliennes. Il représente une menace d'éradication permanente pour tous les carnivores à peau tâchetée : panthères, guépards, tigres, ocelots, etc. Plus de 50 000 peaux de ces animaux seraient chaque année sorties du

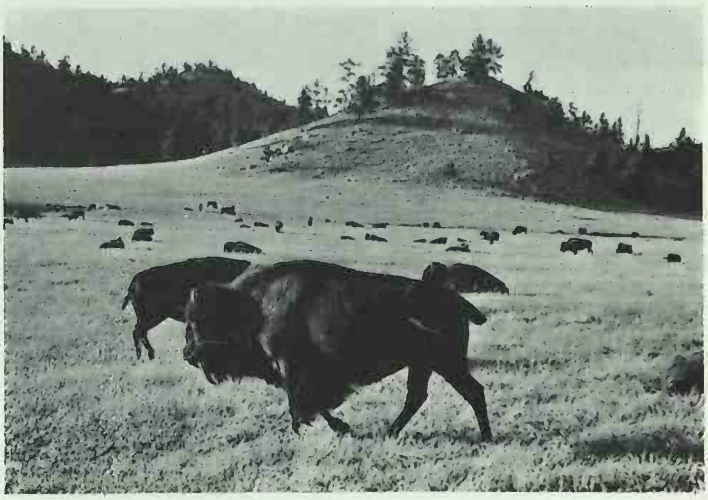


Figure 8.17B
Bison d'Amérique (Bison bison) *dans une réserve du Sud-Dakota (Wind cave National Park) (Cliché H. Vidal)*

UNIVERSITY OF IASI / CENTRAL LIBRARY

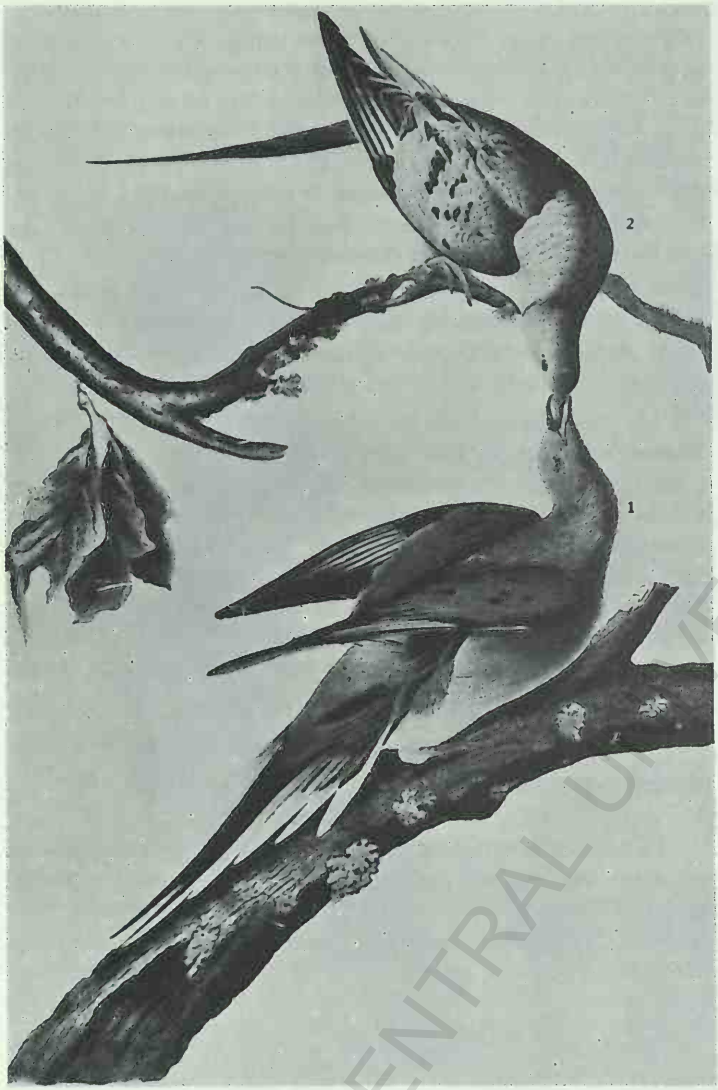


Figure 8.18
Le pigeon migrateur (Ectopistes migratorius) *existait en nombre immense aux Etats-Unis où l'on comptait plusieurs millions d'individus dans certaines de ses colonies au début du siècle dernier : une chasse effrénée a conduit cette espèce à l'extinction (Cliché P. Vallée d'après une lithographie d'Audubon)*

Kenya en contrebande. Au Brésil, le nombre annuel de jaguars abattus a diminué de 50 fois au cours de la dernière décennie, signe de l'anéantissement des effectifs (Yeatman, 1971). En Australie, un million et demi de Marsupiaux, surtout des kangourous, sont annuellement capturés pour leur peau. En même temps, leur viande sert à préparer des aliments pour chiens et chats exportés à raison de 4 000 t par an ! Comme cet abattage est réalisé sans aucun critère d'âge, de sexe ou d'espèce, il s'est traduit par une sensible réduction des effectifs d'espèces autrefois abondantes (Tribe et coll., 1970).

BOSTON / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

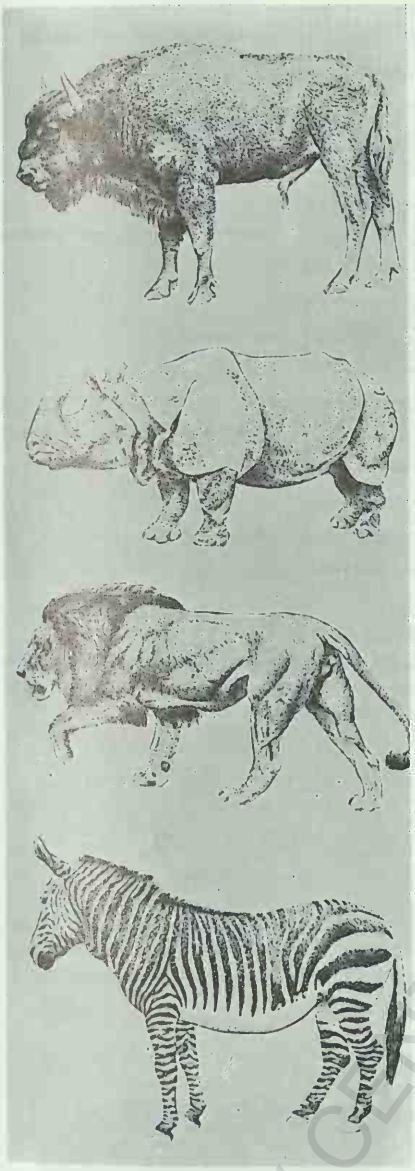


Figure 8.19
Quelques espèces de grands Mammifères rares ou menacées de l'Ancien monde.
A — Bison d'Europe (Bison bonasus), *B — Rhinocéros unicorne de l'Inde* (Rh. unicornis). *C — Lion d'Asie, D — Zèbre de montagne* (Equus zebra). *D'après Monod* in *Heim et coll. "Derniers refuges", Elsevier ed., 1956, p. 37.*

La pelleterie constitue sur tous les continents une importante cause de régression des mammifères, même pour des espèces d'ongulés aux populations nombreuses. Les céphalophes, petites antilopes forestières, se sont considérablement raréfiées en Afrique occidentale. Il est vrai qu'en 1953, quelque deux millions de peaux de céphalophes auraient fait l'objet de transaction dans les territoires africains de ce qui formait l'Union française.

La vente de l'ivoire s'est traduite au cours du siècle dernier par un véritable massacre des éléphants d'Afrique dont 70 000 individus étaient tués chaque année pour satisfaire la demande des marchés européens (Dorst, 1965).

La plumasserie constitua au début de ce siècle une activité catastrophique pour l'avifaune. Elle fut aux Etats-Unis une des cause de l'extinction du perroquet des Carolines *(Conuropsis Carolinensis)* qui s'est éteint au cours des années 30.

Les Aigrettes, dont plusieurs espèces inféodées à la Floride, les oiseaux de paradis, les Psittaciformes, les Colibris, eurent énormément à souffrir du commerce des plumes auquel mit fin la versatilité de la mode.

La vente d'oiseaux et de mammifères comme animaux de volière ou de salon, en particulier celle d'espèces déjà très raréfiées à des jardins zoologiques privés, représente un très important élément de défaunation. Aux Etats-Unis, quelque 90 000 singes platyrhiniens sont ainsi annuellement importés pour être vendus à des particuliers.

La récolte des œufs au nid par des collectionneurs est particulièrement néfaste pour diverses espèces peu prolifiques comme les rapaces. Elle est aussi le fait de populations insulaires sous-développées qui capturent au nid les jeunes et prélèvent les œufs dans des colonies de diverses espèces d'oiseaux de mer, en particulier des Procellariiformes afin de s'en nourrir.

Parmi les multiples motivations d'une chasse abusive à telle ou telle espèce animale, celle qui a conduit à la régression des rhinocéros asiatiques mérite d'être signalée (fig. 8.19). Elle réside en d'imaginaires vertus aphrodisiaques attribuées par les orientaux à la corne et à l'ensemble du corps de ces malheureux animaux, et constitue l'unique cause de leur quasi-disparition.

Un seul de ces grands périssodactyles peut valoir la moitié de son pesant d'or ! Aussi ne faut-il pas s'étonner si le rhinocéros de l'Inde ne compte plus que quelques centaines d'individus, surtout dans la réserve de Kaziranga en Assam, le rhinocéros bicorne de Sumatra *(Didermoceros sumatrensis)* une cinquantaine et celui de Java *(Rhinoceros sondaicus)* une vingtaine de survivants dans la Réserve d'Udjong Kulong (dans Fitter, 1968). Autrefois largement répandus dans le continent indien et le Sud-Est asiatique, ces rhinocéros n'occupent plus de nos jours qu'une infime fraction de leur ancienne aire d'extension (fig. 8.20).

BCU Lyon / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

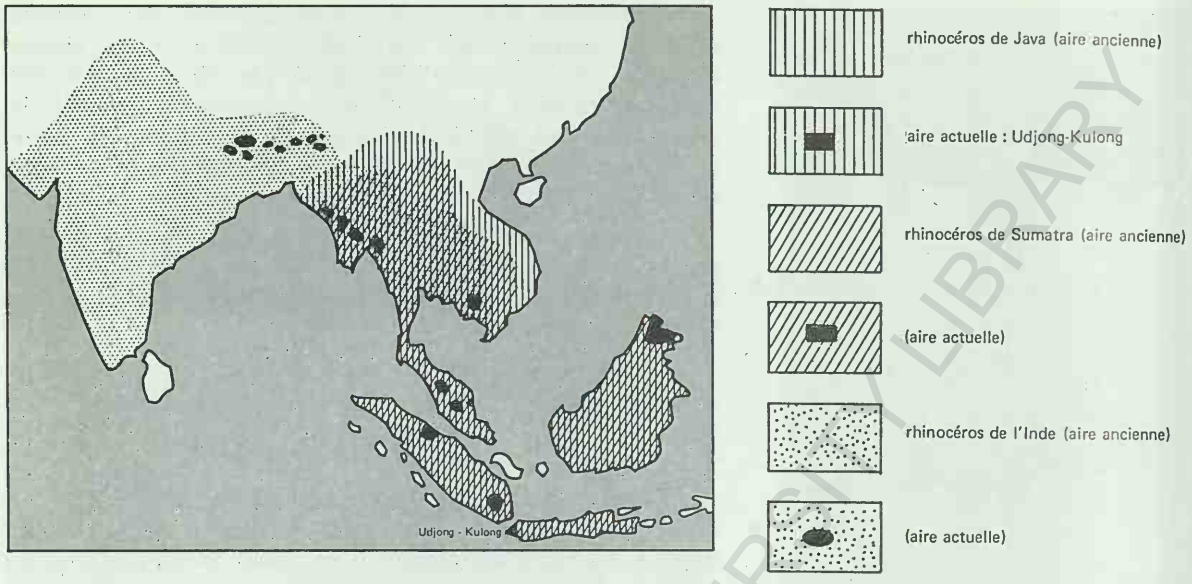


Figure 8.20
Carte de la régression de l'aire de distribution géographique des Rhinocéros asiatiques. D'après divers auteurs

Enfin, la chasse en tant que "sport", le vandalisme humain aidant, a toujours été une cause essentielle d'hécatombes d'animaux sauvages. C'est à elle qu'il faut attribuer la disparition de bien des espèces d'Europe et d'Amérique du Nord : Urus et Bison, l'un éteint, l'autre confiné de nos jours à la Réserve de Bielowieza en Pologne (Kowalski, 1971), (fig. 8.19 et 8.21), Grizzly dont il n'existe plus que quelques centaines d'individus dans tout le continent nord-américain, grue blanche *(Grus americana)* dont la cinquantaine de survivants (1) est actuellement menacée par des chasseurs irresponsables au cours de sa longue route de migration qui la mène du Grand Nord canadien au refuge d'Aransas, où elle hiverne, dans le Texas.

La place de la France dans ce domaine, comme d'ailleurs en tous ceux qui se rapportent à la protection de la Nature, est loin d'être enviable. Faut-il rappeler qu'aucune espèce de Mammifère n'est protégée dans notre pays, lequel n'a pas encore signé la convention internationale de Protection des oiseaux de 1950 ?

Il suffit pour s'en convaincre de comparer l'œuvre britannique dans les anciens territoires est-africains de la Couronne, où furent créés de magnifiques Parcs nationaux, à l'incurie qui fut en cette matière l'apanage de l'ancienne administration coloniale française (2). Nos compatriotes ont donné un magnifique exemple d'irresponsabilité aux peuples qu'ils se devaient d'éduquer. Ils ont quasiment exterminé en quelques décennies une faune mammalienne autrefois tout aussi riche et même plus diversifiée que celle d'Afrique orientale. Une chasse effrénée y a fait disparaître la girafe, le rhinocéros, la plupart des éléphants et provoqué une

(1) En 1967, on dénombrait seulement 6 couples nicheurs dans sa principale aire de nidification, dans le Parc National de Wood Buffalo, au Canada.

(2) Nous ne méconnaissons pas, tant s'en faut, le mérite des premiers inspecteurs du corps des Chasses de l'ex-Afrique française, comme Bourgoin, Saint Floris, Flizot, Cabaille et bien d'autres. Malheureusement il faut bien convenir que leur œuvre fut limitée par l'incompréhension de leurs compatriotes.

BOTANISCH CENTRAAL UNIVERSITY LIBRARY

considérable raréfaction de diverses espèces d'antilopes. Aujourd'hui, les savanes ivoiriennes et guinéennes sont vides d'animaux. Plusieurs mammifères d'Afrique occidentale figurent sur la liste rouge des vertébrés en danger de disparition éditée par l'Union internationale de Conservation de la Nature. Tel est le cas de l'Addax *(Addax nasomaculatus)* du sud du Sahara, que les prospecteurs pétroliers et les militaires français chassaient en jeep au fusil-mitrailleur, de l'élan de Derby occidental *(Taurotragus d.derbianius)* dont il ne subsiste plus que quelques dizaines d'individus aux frontières de la Guinée, du Mali et du Sénégal.

Il en a été de même au Cambodge où les colons puis les coopérants français ont le triste mérite d'avoir joué un rôle prépondérant dans l'extinction de la dernière espèce de grand mammifère décrite par les zoologistes, le bœuf Kouprey *(Bos sauveli)* connue seulement depuis 1937. Comme l'écrit Pfeffer (1970) *"ce qui provoque les plus grands ravages dans la faune au Cambodge, c'est la chasse en véhicule automobile, le plus souvent à l'aide des phares . . . au premier rang de ces spécialistes du braconnage figurent nos compatriotes qui donnent là un triste exemple à ceux qu'ils sont censés aider ou éduquer".*

L'influent groupe de pression que constituent les chasseurs-électeurs a jusqu'à présent réussi à bloquer toute réforme sérieuse de la chasse qui aurait permis de protéger efficacement la faune de notre pays.

C'est à une pression de chasse exagérée qu'il faut en premier lieu attribuer l'importante régression des oiseaux et des mammifères sauvages. N'oublions pas qu'avec plus de deux millions de chasseurs, notre pays compte presque autant de fusils que tous les autres pays d'Europe occidentale réunis, Scandinavie inclue ! En outre, cet effectif a tendance à croître, comme en atteste la figure 8.22. L'action drastique, sans rapport avec les possibilités cynégétiques du territoire national, qu'exercent ces trop nombreux chasseurs, l'ont transformé en quelques années en un désert faunistique. Plusieurs facteurs favorisent cette éradication de toute vie sauvage. L'absence d'intérêt chez la plupart d'entre eux pour ce qui se rapporte au problème essentiel de la protection du gibier en constitue un élément déterminant. Rappelons, par exemple, que chaque année sont abattus par des vandales, de nombreuses grues, cigognes ou cygnes en migration, ou qu'il n'est pas rare de trouver des flamants roses *tués à la chevrotine* dans la réserve de Camargue.

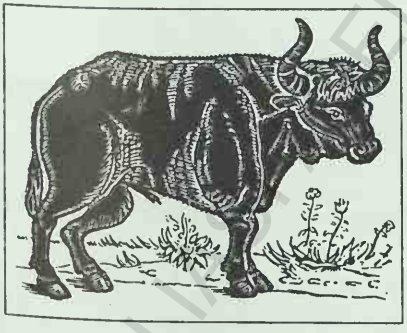


Figure 8.21
Le dernier auroch, l'ancêtre sauvage du bétail domestique, s'est éteint en Pologne en 1627. Ce dessin date de 1557 (in Kowalsky, 1971)

La méconnaissance ne peut être évoquée dans le cas de ces espèces protégées. De tels actes sont hélas par trop fréquents, malgré les méritoires efforts d'éducation entrepris par des associations comme le Saint-Hubert Club. Mais en outre, la destruction de toute vie animale est facilitée par l'inefficacité d'une législation qu'émasculent d'innombrables dérogations. Faut-il rappeler l'ouverture hors saison de la chasse à divers oiseaux migrateurs, à laquelle l'administration paraît incapable de mettre un terme définitif, l'autorisation de la chasse sur diverses pistes, en plein cœur de la

EQUIPE CENTRALE UNESCO LIBRARY

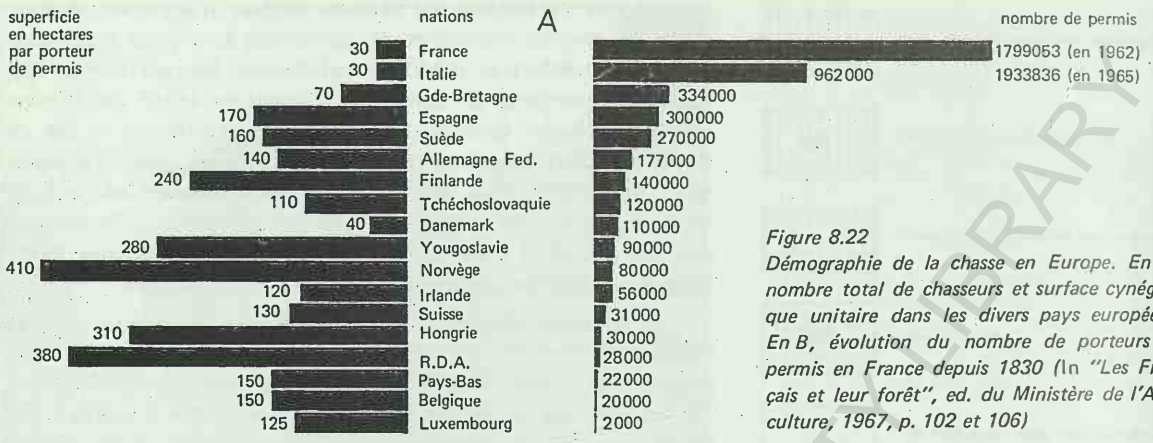


Figure 8.22
*Démographie de la chasse en Europe. En A, nombre total de chasseurs et surface cynégétique unitaire dans les divers pays européens. En B, évolution du nombre de porteurs de permis en France depuis 1830 (*In *"Les Français et leur forêt", ed. du Ministère de l'Agriculture, 1967, p. 102 et 106)*

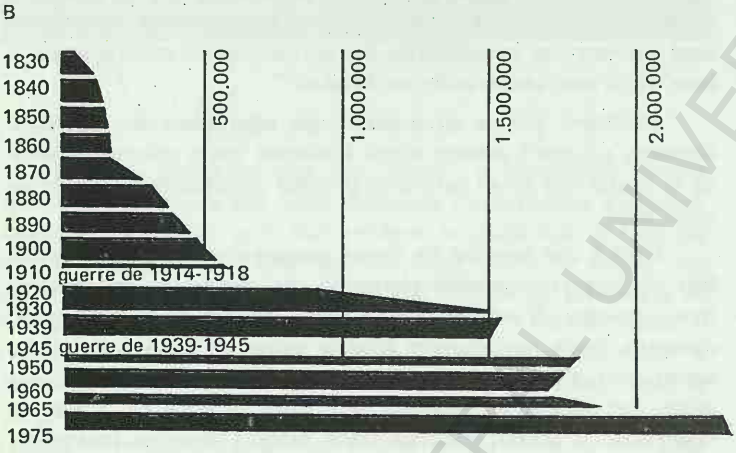


Planche XXVII
Industrialisation et protection de la faune
1) Flamants roses (Phoenicopterus ruber) *sur un étang en Basse-Camargue.*
2) Paysage industriel dans le golfe de Fos. En 1969, les flamants se posaient encore dans le marécage situé au premier plan aujourd'hui partiellement remblayé par une route. Les eaux polluées par des hydrocarbures et la carcasse d'automobile abandonnée témoignent de l'inexorable avance du "progrès".
(clichés F. Ramade)

Réserve zoologique de Camargue, "l'omission" par les préfets de fermer celle-ci pendant la période de gel prolongé qui a sévi sur le littoral atlantique au cours de l'hiver 1977-1978 ? Faut-il aussi souligner que la France possède le triste record de durée de la saison d'ouverture, en particulier pour la sauvagine, ruinant ainsi les efforts de protection entrepris par d'autres pays européens dans les aires de reproduction de ces espèces. Enfin, nous ne nous étendrons pas sur le cas de parcs nationaux comme ceux des Cévennes ou des Ecrins et de parcs naturels régionaux qui, oubliant leur vocation primitive — et en contradiction avec la réglementation édictée par l'U.I.C.N. — non seulement tolèrent mais encore favorisent en certains cas les activités de chasse !

Les mesures prises pour la protection de la faune, en particulier la réforme du Conseil Supérieur de la Chasse du 26 avril 1972, apparaissent à bien des égards trop timides et trop tardives pour protéger quoi que ce soit [1].

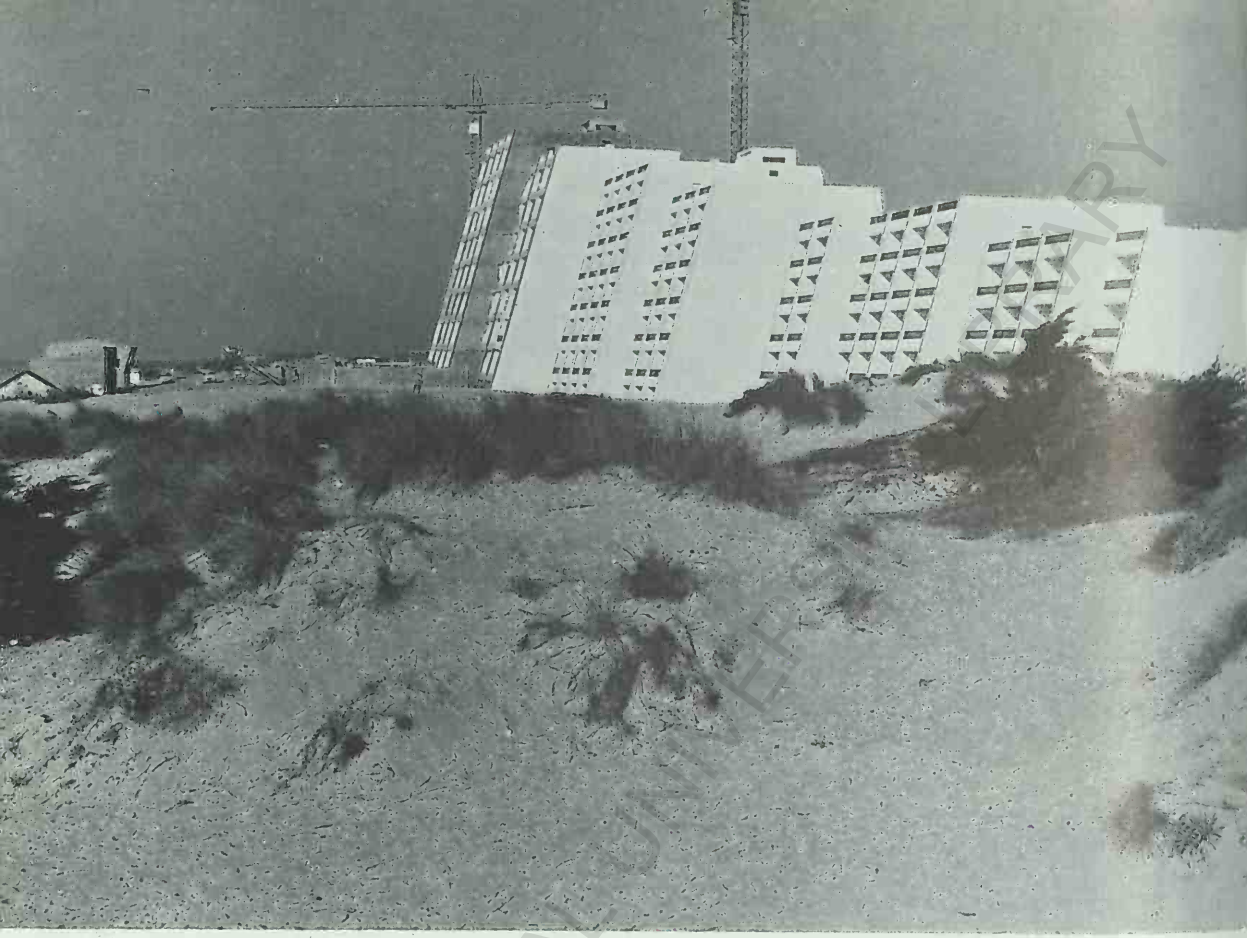
(1) Il est entre autres choses fort surprenant qu'un tel Conseil, destiné à protéger la faune, ne comporte parmi trente deux membres qu'un seul universitaire Professeur de zoologie et en tout trois personnalités scientifiques dont aucun écologiste en titre.

BIBLIOTECA CENTRAL UNIVERSITARIA

1

2

CENTRAL UNIVERSITY



1

2

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

A côté de la chasse ou conjuguant leurs effets avec celle-ci, la modification et la destruction des biotopes ont joué un rôle fondamental dans l'appauvrissement de la faune terrestre mondiale.

La destruction des forêts vierges ripicoles des Etats bordant le golfe du Mexique causa de la sorte la perte du Pic géant à bec d'ivoire *(Campephilus principalis)* dont les deux derniers exemplaires vivants furent observés en 1952 selon Wallace (fig. 8.23).

Figure 8.23
Le Pic à bec d'Ivoire (Campephilus principalis). *Cette espèce aujourd'hui disparue, a été éliminée du territoire américain par la destruction des ripisylves primitives du Golfe du Mexique (Cliché P. Vallée, d'après une lithographie d'Audubon)*

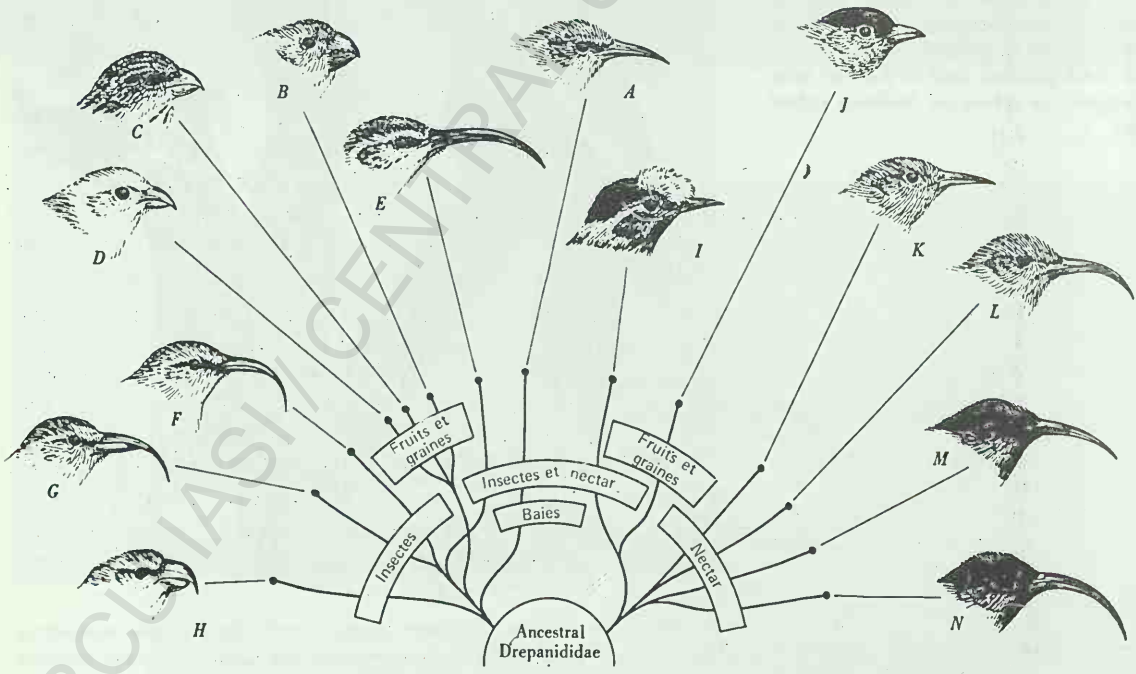
Planche XXVIII
Dunes littorales et urbanisation
1) Milieu nécessairement très limité en surface, les dunes littorales sont menacées plus qu'aucun autre biotope par la promotion immobilière. Peut-être envisagera-t-on sérieusement de les préserver lorsque tout le front de mer, de Dunkerque à Bayonne, aura été "aménagé" en un "mur de l'Atlantique" dont les immeubles ci-contre préfigurent "l'aspect fonctionnel" ! (cliché M. Brosselin)
2) Une dune protégée dans la Réserve naturelle intégrale de Texel, en Hollande (cliché I. Földi)

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le gorille de montagne *(Gorilla g. beringuei)* aujourd'hui confiné aux Monts Virunga, en Ouganda, et à quelques forêts d'altitude du Congo, est aussi en danger d'extinction. Cette espèce est inféodée aux bambuseraies orophiles et aux forêts d'*Hagenia* qui occupent l'étage immédiatement supérieur. Il n'en subsisterait plus que quelques milliers d'individus, sans cesse menacés par la destruction de leur habitat forestier envahi et surpâturé par les troupeaux des pasteurs nomades Tutsis, (Schaller, 1964). On ne peut encore concevoir les graves conséquences pour la recherche médicale de l'extinction du gorille de montagne, le primate le plus proche de l'homme.

D'autres animaux du plus haut intérêt scientifique, comme les lémuriens malgaches, sont aussi en voie de raréfaction à cause du recul incessant des forêts primitives qui abritent la plupart de ces espèces (Petter, 1963).

Il en est de même pour de nombreux oiseaux insulaires dont diverses espèces ont disparu à la suite d'une déforestation massive. Ainsi, sur 68 espèces que comptait l'avifaune terrestre des îles Hawaï, 40 sont aujourd'hui éteintes à la suite de la destruction complète de leur habitat forestier, dont de nombreux Drepaniides (fig. 8.24), passereaux aux multiples radiations évolutives, endémiques de cet archipel.



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

D'autres modifications d'écosystèmes, comme la destruction des haies dans les pays de bocage (remembrement) et l'assèchement des zones humides (lagunes et marécages) dans les régions tempérées et tropicales, provoquent des bouleversements biocœnotiques fatals à bien des espèces aviennes.

C'est à la disparition des marécages qu'il faut attribuer la raréfaction des grues en Europe occidentale (où elles ne nichent plus depuis quelques siècles) et en date plus récente la régression des cigognes.

La dernière modalité par laquelle l'homme peut provoquer indirectement la disparition de nombreuses espèces animales provient des modifications biocœnotiques liées à l'introduction dans une communauté d'espèces originaires d'autres continents. Les êtres vivants ainsi libérés dans une nouvelle biocœnose dépourvue de leurs prédateurs et compétiteurs naturels se multiplient alors sans entrave au détriment des espèces endémiques dont la niche écologique se réduit beaucoup et peut même être totalement occupée par le nouvel arrivant.

L'importation du lapin en Australie constitue un magnifique exemple des bouleversements écologiques, toujours néfastes, qui résultent de ces introductions intempestives. Le lâcher de 24 individus de cette espèce en provenance d'Angleterre, en 1874, fut suivi d'une véritable explosion démographique d'un rongeur dont la prolificité se trouva exaltée par l'absence totale d'ennemis naturels. Quelque 248 millions de peaux de lapin furent exportées d'Australie entre 1945 et 1949 (dans Dorst, 1965), ce qui témoigne de l'extraordinaire densité qu'atteignirent ces populations sur ce continent.

L'influence de ce rongeur sur la végétation et sur la faune fut catastrophique. Il provoqua l'érosion de sols dans des milieux subarides (Fenner et Ratcliffe, 1965) et aussi la raréfaction sinon l'élimination de bien des espèces de Marsupiaux. Celle-ci fut accélérée par l'introduction du renard, réalisée dans le but de réduire les populations de lapin, et qui fit des ravages dans la faune autochtone.

Les animaux endémiques des îles de la mer des Caraïbes furent aussi gravement raréfiés par l'introduction de divers carnivores, en particulier la mangouste importée à Cuba pour combattre les serpents et à la Jamaïque pour éliminer les rats qui dévastaient les plantations de canne à sucre. Dans un cas comme dans l'autre, le but poursuivi ne fut pas atteint : les serpents diminuèrent légèrement de densité tandis que les rats jamaïcains s'adaptèrent à la vie arboricole pour échapper aux mangoustes. En revanche, la faune des îles, exposée à la prédation de ce carnivore, ne supporta pas cette rupture d'équilibre biocœnotique et subit des pertes irréparables.

L'introduction intempestive de la mangouste fit disparaître la plupart des rongeurs endémiques des Grandes Antilles, de la famille

Figure 8.24
Adaptation à diverses niches écologiques chez les Drepaniides des Iles Hawaï.
A — Loxops virens, *insectivore et végétarien (nectar et baies) ; B* — Psittorostra Kona, *granivore, éteint ; C* — P. Cantans *entomophage et végétarien, inféodé au Conifère* Freycinetia arborea — *cette espèce, longtemps considérée comme éteinte, a été redécouverte pendant les années 40 ; E* — Hemignathus obscurus, *insectivore et nectarivore ; F* — H. lucidus *et (G)* H. Wilsoni, *entomophages ; H* — Pseudonestor xanthophrys *qui se nourrit exclusivement de Cerambycides ; I* — Palmeria dolei *insectivore et nectarivore, qui butine l'Ohio* (Metrosideros), *ces deux derniers Drepaniides furent aussi longtemps considérés comme éteints ; J* — Ciridops anna, *frugivore et granivore ; K* — Himatione sanganuine, *qui se nourrit du nectar de l'Ohio et de chenilles ; L* — Vestoria coccinea, *de régime alimentaire identique mais moins éclectique ; M* — Drepanis funera, *nectarivore, éteint ; N* — Drepanis pacifica, *nectarivore, éteint. Au total, sur 14 espèces de Drepaniides, 3 sont aujourd'hui disparues et quatre raréfiées à l'extrême. De façon générale, toutes ces espèces sont menacées d'extinction par suite de la destruction des forêts autochtones qui constituent leur unique habitat. D'après divers auteurs,* in *R.L. Smith "Ecology and field biology", Harper and Row ed., 1966, p. 469*

des Echimyidés. Elle conduisit au bord de l'extinction les insectivores géants de Cuba et Hispaniola *(Solenodon sp.)* dont il ne subsiste plus aujourd'hui qu'un tout petit nombre d'individus dans des forêts reculées de ces îles.

On peut citer des exemples comparables en bien des régions insulaires du Monde, en particulier aux îles Galapagos où plus encore que la chasse, l'introduction des rats, des chiens, des porcs et des herbivores domestiques a provoqué la quasi-disparition de l'étonnante faune reptilienne qu'hébergeait cet archipel isolé dont l'étude inspira *pro parte* à Darwin sa fameuse théorie de l'évolution.

L'épuisement des richesses océaniques

L'Océan symbolise depuis toujours dans l'esprit humain l'archétype de l'immensité. Le grouillement de la vie littorale, la densité fantastique de certaines populations ichtyennes, le gigantisme des grands vertébrés marins ont toujours engendré le sentiment de richesses inépuisables. Aussi n'est-il pas surprenant que l'imprévoyance et la rapacité humaines aient très tôt surexploité les ressources océaniques et souvent conduit à leur épuisement.

Les premières victimes de ce pillage d'inestimables richesses naturelles furent divers mammifères marins : siréniens, phoques et cétacés.

La Rhytine de Steller *(Hydromamalis stelleri),* apparentée au Dugong, fut découverte par Behring en 1742 sur les rives de la mer d'Okhotsk. Ce sirénien géant, atteignant 10 mètres de long, qui hantait le Pacifique Nord, fut exterminé par les chasseurs de fourrure un quart de siècle après sa découverte.

La pelleterie causa ainsi la perte de plusieurs espèces de Pinnipèdes au cours du siècle dernier. C'est ainsi que disparut en quelques décennies l'immense colonie d'otaries de l'île Fernandez *(Arctocephalus p. philippi)* dont la population comptait pourtant plusieurs millions d'individus.

Mais c'est peut-être la pêche moderne intensive, réalisée à l'aide des plus récentes technologies — détection des bancs de poissons et des troupes de cétacés au sonar, capture à l'aide de filets géants, chalutage au-delà du plateau continental, conditionnement en navires usines jaugeant des dizaines de milliers de tonnes — qui fournit les meilleurs exemples de surexploitation des ressources naturelles.

Mieux que tout autre, le déclin des grands cétacés illustre bien l'imprévoyance de la civilisation contemporaine. Le gigantisme de ces créatures a fait omettre aux baleiniers la différence fondamentale entre biomasse et productivité biologique. Un rorqual bleu *(Baleinoptera musculus)* peut dépasser 30 mètres de long et un

A

depuis 1945,
le nombre
de baleines tuées
s'est accru

B

pour produire
de moins en moins
d'huile

C

les baleiniers
sont devenus
de plus en plus grands

D

de plus en plus puissants

E

mais leur rendement
de capture
s'est écroulé

F

d'abord, l'industrie a
tué les plus grandes baleines
(Rorqual bleu)

G

puis les Rorquals communs

H

comme ces derniers
se raréfiaient
elle s'est rabattue sur la
baleine boréale

I

maintenant, ce sont
les cachalots
qu'elle surexploite
ultime folie

BIBLIOTECA CENTRALA UNIVERSITY LIBRARY

poids de 100 tonnes. Mais cet animal, le plus grand de tous ceux qui aient jamais peuplé la biosphère, a une vie courte (35 ans environ), se reproduit tard, et possède donc un faible potentiel biotique, à l'image de toutes les autres baleines.

On évalue à 200 000 individus le nombre total de rorquals bleus qui peuplaient l'Océan glacial antarctique lorsque la haute valeur commerciale de la viande et de l'huile de ces animaux conduisit les baleiniers à organiser leur chasse, au lendemain de la première guerre mondiale. Les captures culminèrent en 1930, avec 29 400 individus volume dépassant de beaucoup la capacité reproductive de l'espèce dont les effectifs s'effondrèrent vite (fig. 8.25 F). La reprise de sa chasse en 1945 conduisit à une telle raréfaction de cette baleine qu'elle bénéficie d'une protection internationale depuis 1964. Ceci n'a pas empêché le Pérou et le Chili d'en capturer 450 individus en 1965 et 1966 (fig. 8.25 F).

Les baleiniers se rabattirent alors sur le rorqual commun *(Baleinoptera physalus)* dont une trentaine de milliers furent capturés chaque année à partir de 1938 jusqu'au début des années 50, à l'exception de la période d'interruption de la deuxième guerre mondiale. Puis commença le déclin des effectifs de cette espèce dont seulement 3 000 captures furent effectuées en 1969.

La régression des grands baleinoptères conduisit alors les baleiniers à chasser deux espèces plus petites, la baleine boréale *(Baleinoptera borealis)* et un mégaptère *(Megaptera noveangliae)* dont les populations s'effondrèrent à leur tour très rapidement. Pour la première espèce, on dénombrait 20 000 prises annuelles en 1960 et 6 000 en 1969. La seconde ne pouvait supporter un prélèvement supérieur à 2 000 individus par an car ses effectifs globaux étaient estimés par les biologistes à 50 000 individus dans l'Antarctique avant que ne commence son "exploitation".

A la fin des années 60, l'effort de pêche s'est porté sur les cachalots dont 25 000 individus ont été capturés en 1970. Actuellement les Japonais, dont les responsabilités sont lourdes en cette affaire, en viennent à capturer les Delphinidés . . . avant la mise à la réforme d'une flotte baleinière pléthorique prévisible d'ici la fin de cette décennie.

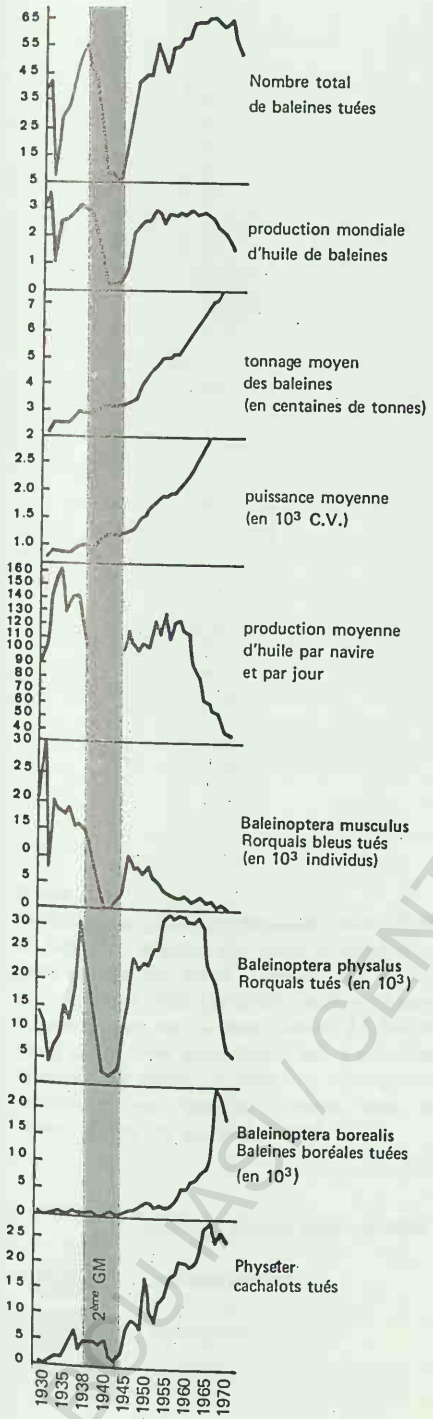


Figure 8.25
Surexploitation des diverses espèces de Baleines et autres Cétacés d'intérêt économique.
Depuis la fin de la première guerre mondiale, et à l'exception de la période 1940-45 où elle dut cesser à cause des hostilités, la pêche à la baleine a connu une croissance ininterrompue grâce au progrès technique qui a permis d'augmenter considérablement la capacité des prises (de A à D). Cependant, l'efficacité a décru sans cesse depuis 1935 à effort de pêche constant (E). A l'effondrement des stocks de B. musculus *(1950) (F) a fait suite celui de* B. physalus *(G) en 1960, puis celui de* B. borealis *(H) en 1965. Depuis cette date, les efforts des baleiniers se portent sur les cachalots dont les effectifs ont déjà sérieusement baissé (I)*
(in Ehrlich, 1970, d'après New York Zoological Society Newsletters, novembre 1968)

PUBLIÉ / CENTRE UNIVERSITAIRE LIBRARY

En réalité, la limitation de la chasse à la baleine, si elle était scrupuleusement respectée, permettrait l'exploitation rationnelle d'animaux qui représentent d'intéressants transformeurs de la production océanique.

Leur production protéique est d'autant plus efficace qu'ils sont situés assez bas dans les chaînes trophiques (Carnivores 1) : 100 kg de zooplancton (Krill), constitués surtout par des Euphausiacées (crevettes) pélagiques, produisent 5 kg de baleine alors que la même quantité de zooplancton ne donne que 50 g de thon, lequel est situé au sommet d'une longue chaîne alimentaire (Carnivore 4). Ce poisson se nourrit en effet de maquereaux, lesquels s'alimentent eux-mêmes de Clupéidés planctonophages.

Il y aurait beaucoup à dire sur les projets actuels de reconversion des baleiniers qui suggèrent de prélever le zooplancton pour en faire des concentrés protéiques. En apparence, les rendements seraient certainement accrus en descendant d'un niveau trophique. Sans évoquer les difficultés techniques et commerciales inhérentes à ces projets, on peut les comparer, comme l'écrit un cétologue éminent, au fait *"d'exterminer les bovins afin d'avoir le plaisir de s'alimenter avec les concentrés protéiques extraits des herbes des pâturages".*

Souhaitons, en guise de conclusion, que les nations développées cessent de se comporter à l'égard des cétacés de façon comparable à celle des conquérants du Far West avec les bisons.

A l'image de la chasse aux mammifères marins, la pêche maritime fournit de nombreux exemples de surexploitation des ressources de la biosphère.

La croissance ininterrompue des besoins protéiques de l'humanité incite la plupart des nations maritimes à développer sans cesse leurs capacités halieutiques. Le nombre et le tonnage des navires de pêche croissent de façon ininterrompue depuis la fin de la seconde guerre mondiale, et en conséquence les prises de poissons et d'invertébrés tant pélagiques que benthiques. La production des pêcheries mondiales est passée de 20 millions de tonnes en 1938 à 64 millions de tonnes en 1968 (Fig. 8.26).

Il devient assez évident que les rendements ne croîtront plus dans les mêmes proportions d'ici la fin du siècle malgré l'ambitieux plan de développement agricole de la FAO, lequel prévoit d'atteindre un objectif proche de 200 millions de tonnes en 1985. Ryther (1969) évalue au total à 240 m.t./an la production secondaire océanique en poissons, dont tout au plus la moitié peut être prélevée. Ricker (1969) considère même que les 100 millions de tonnes seront difficilement atteints en 1990.

La question fondamentale est de savoir si dans des conditions économiques acceptables les populations ichtyennes existantes pourront permettre de tels prélèvements.

BUFFALO CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

N'oublions pas qu'il existe pour toute espèce animale un niveau de capture optimal qui permet un rendement maximum de la pêche (ou de la chasse) sans faire décliner ses effectifs.

Considérons une population naturelle. Celle-ci est en équilibre avec le milieu à un niveau moyen correspondant à sa capacité limite (cf. chapitre II, p. 137). Si l'homme modifie les conditions écologiques, en particulier la concurrence interspécifique, en prélevant une partie de la population (mortalité halieutique) il en résultera une transformation de la structure démoécologique. Au-dessous de la capacité limite du milieu, chaque adulte donnera un nombre de descendants féconds supérieur à l'unité. Il est par ailleurs évident que le nouveau niveau de population se maintiendra indéfiniment si on laisse la possibilité à chaque individu en période reproductive d'engendrer un descendant qui lui-même pourra se reproduire. En revanche, les poissons en surnombre pourront être prélevés sans craindre de provoquer un effondrement des stocks (fig. 8.27 A).

Nous en venons donc à définir un rendement maximum d'exploitation qui peut être maintenu en permanence. On peut

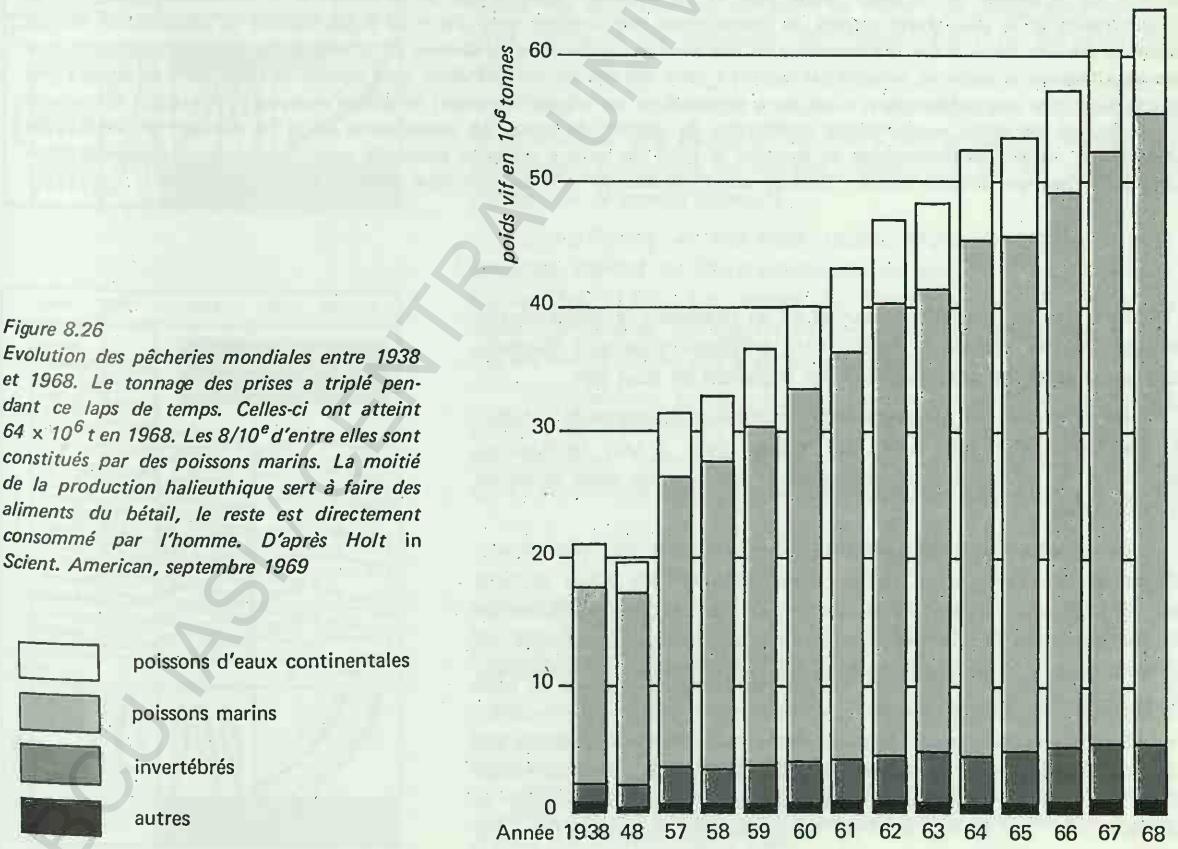


Figure 8.26
Evolution des pêcheries mondiales entre 1938 et 1968. Le tonnage des prises a triplé pendant ce laps de temps. Celles-ci ont atteint 64 x 10^6 t en 1968. Les 8/10^e d'entre elles sont constitués par des poissons marins. La moitié de la production halieuthique sert à faire des aliments du bétail, le reste est directement consommé par l'homme. D'après Holt in *Scient. American, septembre 1969*

ECU IAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

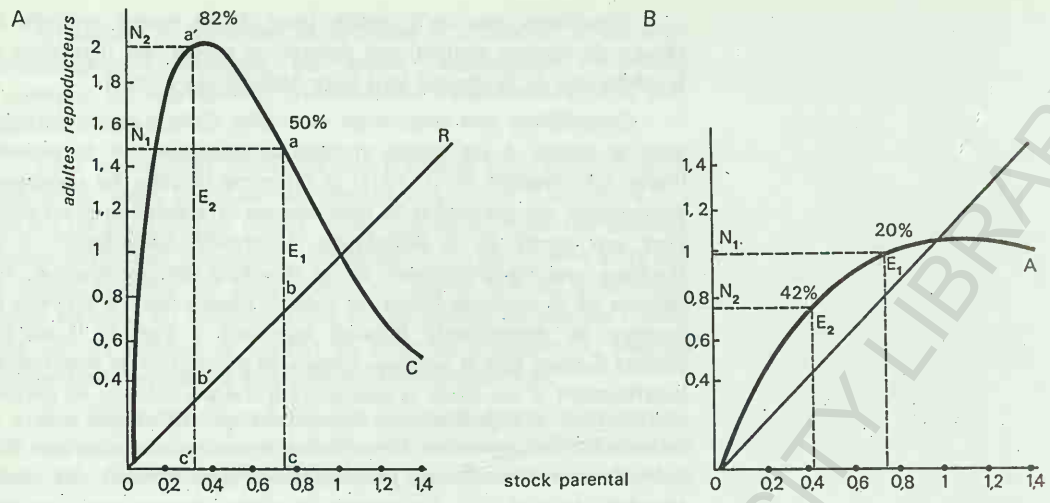


Figure 8.27

Fondements démoécologiques de l'exploitation rationnelle d'une population animale. Ici sont figurées les courbes représentant le taux d'exploitation. Les stocks ne peuvent se maintenir que si les prélèvements effectués sont inférieurs ou égaux au segment parallèle aux ordonnées et de longueur au plus égale à la distance comprise entre la courbe et la droite OR (E). Le segment ab = E est la récolte, bc le stock laissé pour la reproduction. Dans le cas de la courbe A, le rendement maximum de l'exploitation et le plus grand surplus de reproduction sont atteints pour a'b' = 82 % du nombre de descendants féconds produits par une classe d'âge. Remarquer aussi que dans la courbe A, le rendement est d'autant plus grand que le nombre de jeunes atteignant la maturité sexuelle par rapport à celui des adultes est plus élevé, sauf lorsque le stock parental devient trop faible. Ceci n'est pas valable dans le cas de la courbe B où un effectif important de jeunes atteignant la maturité sexuelle ne s'accompagne pas d'une augmentation significative du nombre de prises. La connaissance de la loi donnant la variation des effectifs du nombre de descendants en fonction de celui des parents est donc essentielle pour l'exploitation rationnelle d'une population animale. D'après Smith, "Ecology and Field biology", Harper and Row 1966, p. 417

l'obtenir soit en laissant les jeunes et en prélevant la majorité des adultes car les animaux marins sont extraordinairement féconds, soit par une pêche plus modérée des individus de tout âge.

Aller au-delà de ce *rendement maximum supportable* conduit à une diminution de taille des prises, puis à une raréfaction accélérée de la population, phénomène bien connu sous le terme d'*overfishing.*

En d'autres termes, l'exploitation rationnelle des pêches implique un équilibre entre l'importance annuelle des prises et celle des effectifs qui chaque année entrent en période reproductive. La connaissance de ce dernier paramètre démoécologique permet de prélever sans danger pour l'espèce les reproducteurs et les immatures en surnombre.

Pour de nombreuses espèces, les caractères de croissance, de mortalité naturelle et de succession des classes d'âge reproductives sont tels que le rendement maximum supportable, défini par le segment *a'b'* sur la fig. 8.27 A, est nettement délimité. Dans ce

EPUM / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

cas, le volume des prises variera rapidement pour une faible fluctuation de l'effort de pêche. Remarquons aussi que pour une telle population, le rendement maximum des pêcheries sera obtenu avec un effectif d'adultes reproducteurs nettement inférieur à la capacité limite du milieu pour cette classe d'âge. Ce phénomène, d'apparence paradoxale, résulte du fait que pour une trop grande densité d'individus à maturité, la concurrence intraspécifique devient très sévère pour les jeunes qui périssent en grand nombre. En effet, les adultes subtilisent la nourriture aux immatures qui meurent d'inanition. Dans certains cas, il peut même se manifester du cannibalisme quand les effectifs sont trop nombreux (fig. 8.28).

Ces divers éléments expliquent pourquoi dans l'exemple choisi à la fig. 8.27 A, la productivité sera plus faible pour un stock parental de 0,8 unité arbitraire que pour 0,4 unité arbitraire. Ainsi, l'exploitation rationnelle par l'homme d'une population ichtyenne déterminée peut accroître les rendements des pêcheries car elle provoque un accroissement de la productivité secondaire nette. Le plus grand nombre de jeunes survivants utilise en effet les aliments disponibles avec un meilleur coefficient de transformation que les adultes.

Pour certaines espèces, toutefois, l'optimum est moins bien défini (fig. 8.27 B). Une variation de l'effort de pêche dans un assez large domaine ne modifiera pas sensiblement l'importance des prises.

Malgré les optimistes prévisions d'accroissement substantiel de la production des pêcheries au cours des prochaines années, les écologistes éprouvent un certain scepticisme sur les possibilités d'atteindre de pareils objectifs.

L'overfishing se manifeste depuis plusieurs décennies pour certaines espèces du Nord-Atlantique du plus haut intérêt économique (fig. 8.29). Les stocks de flétan se sont effondrés dès 1920. Le carrelet et l'églefin s'étaient déjà considérablement raréfiés en mer du Nord dès le début du siècle.

Actuellement, la reproduction du hareng, que l'importance des prises, avec 3,8 millions de tonnes en 1968, classe au second rang des pêcheries mondiales après l'anchois péruvien, n'est assurée dans l'Atlantique Nord que par les deux premières classes d'âge en

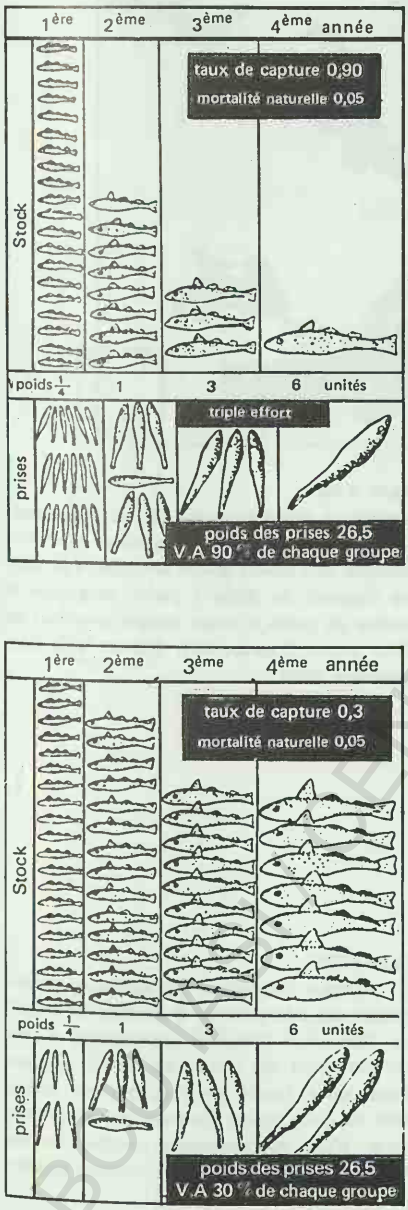


Figure 8.28
Influence de l'effort de pêche sur les effectifs d'une population de poissons et l'importance des prises. Les deux diagrammes ci-contre comparent les effets d'un effort de pêche qui permet de capturer 90 % des effectifs avec ceux qui correspondent au prélèvement de 30 % du stock. Le poids des prises est le même dans un cas comme dans l'autre mais dans le premier les individus de petites tailles deviennent prépondérants. En conséquence, l'abondance d'une population de poissons tend à s'accroître quand décroît l'effort de pêche, ce qui donne la possibilité d'obtenir une quantité de prises égale avec un effort moindre. D'après Graham, Nature, 142, 1938, p. 1144

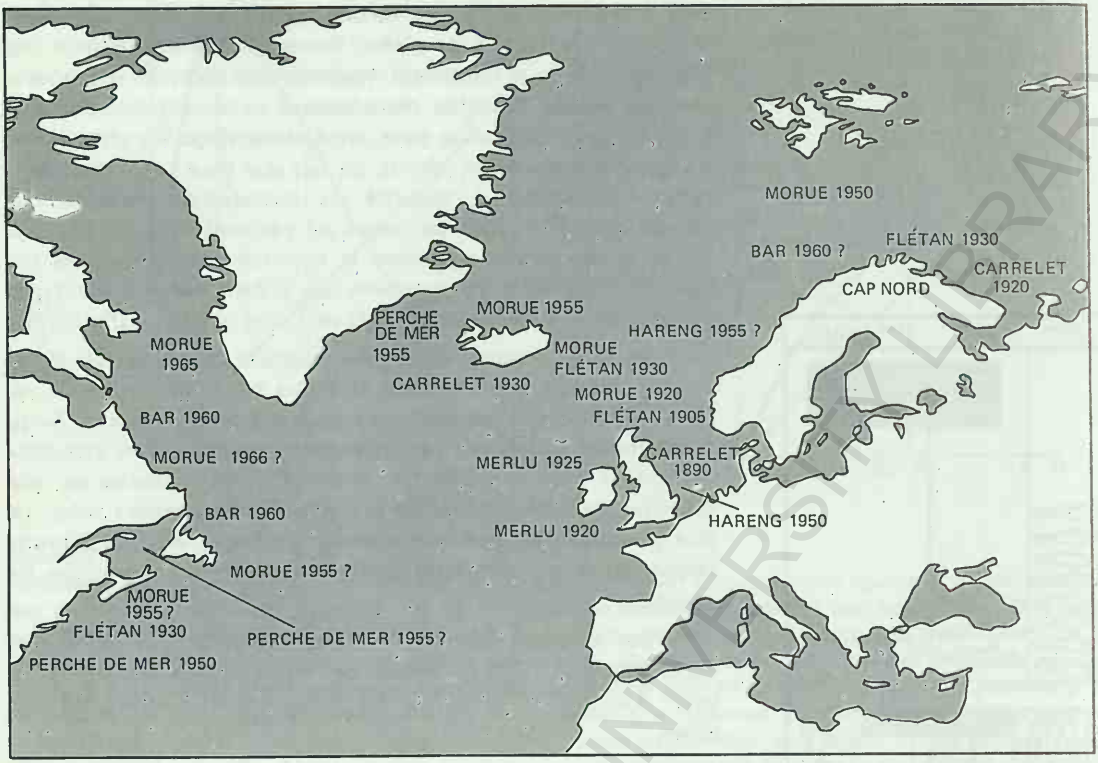


Figure 8.29
Overfishing des principales espèces de poisson de grande importance halieuthique dans l'Atlantique et l'Océan glacial arctique. Les chiffres figurent les dates à partir desquelles le nombre de prises a baissé malgré un effort de pêche accru. D'après Holt, Scient. American, septembre 1969

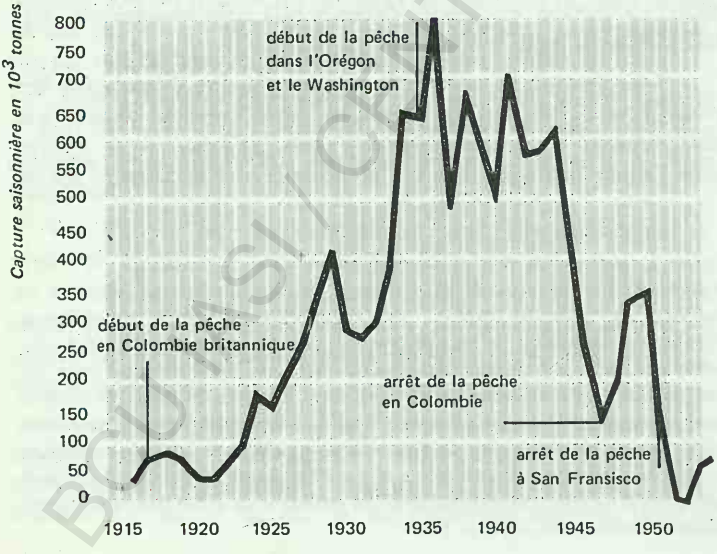


Figure 8.30
Un exemple dramatique d'Overfishing. L'extinction des pêcheries de la Sardine du Pacifique (Sardinops coerulea) *consécutive à une surexploitation du stock. En 1970, quelque 15 ans après l'arrêt de l'exploitation industrielle de cette espèce n'existait encore aucune preuve d'une reconstitution sensible de ses effectifs (*in *Dasmann, Environmental conservation, Wiley ed. 1972, p. 314).*

BCU - ASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

période reproductive. On se trouve donc à la limite de l'effondrement des effectifs ainsi qu'en atteste la chute des rendements islandais et norvégiens, passés de 1,2 million de tonnes en 1967 à 0,19 million de tonnes en 1969.

L'overfishing devient de plus en plus préoccupant de nos jours. Sur 30 espèces d'importance économique majeure considérées en 1949 comme sous-exploitées par les experts, plus de la moitié présentaient vingt ans plus tard des signes évidents d'épuisement des stocks (Holt, 1969).

Cette surexploitation peut d'ailleurs conduire à l'extinction des pêcheries de certaines espèces. Tel fut par exemple le cas de la sardine du Pacifique, *Sardinops coerulea,* un des plus célèbres exemples d'overfishing aberrant d'une espèce de haut intérêt économique. Cette sardine vivait sur la Côte occidentale d'Amérique du Nord par bancs comptant des millions d'individus. Huit cent mille tonnes en furent débarquées au cours de la saison de pêche 1936-37 dans les ports américains entre San Diego et la Colombie Britannique. Cette industrie rapportait alors dix millions de dollars par an ! Les populations de cette espèce s'effondrèrent à partir de 1947, ce qui provoqua la fermeture successive de toutes les industries dépendant de l'exploitation de cette ressource animale (fig. 8.30). Les effectifs n'ont pu se reconstituer depuis 1953, date où fut pratiquement arrêtée aux Etats-Unis la pêche de cette espèce. Cette année-là, seulement 80 tonnes de sardines furent prises au cours de la campagne par les chalutiers de San Francisco !

Un exemple actuel d'exploitation irraisonnée des ressources océaniques est constitué par l'overfishing de l'anchois péruvien *(Engraulis ringens).* Quelque 11,2 millions de tonnes de ce poisson furent capturés en 1969-70, soit dix mille milliards d'individus. La même année, les experts de la FAO établissaient que le rendement maximum supportable n'excédait pas 9,5 millions de tonnes pour cette espèce. Les prélèvements excèdent donc déjà les capacités de ses effectifs, aussi immenses soient-ils. La productivité extraordinaire des eaux côtières du Pérou, dans lesquelles cette anchois prolifère, résulte de la remontée d'éléments nutritifs très importante *(upwelling)* provoquée par les eaux froides australes du courant de Humboldt qui longe les rivages de ce pays.

Le plateau continental péruvien figure parmi les principales zones d'upwelling de l'Océan mondial, ce qui explique sa très haute productivité biologique (fig. 8.31).

Zooplanctonophages à l'état larvaire, les anchois se nourrissent ensuite de phytoplancton quand ils arrivent à maturité, ce qui accroît l'efficacité de leur production secondaire.

Cette formidable biomasse ichtyenne assurait jusqu'à une récente date la prospérité des immenses colonies d'oiseaux à guano du Pérou, la plus extraordinaire concentration avienne de la biosphère.

B.C.U. „M. EMINESCU" IAȘI
G. ...IE-GEOGRAFIE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

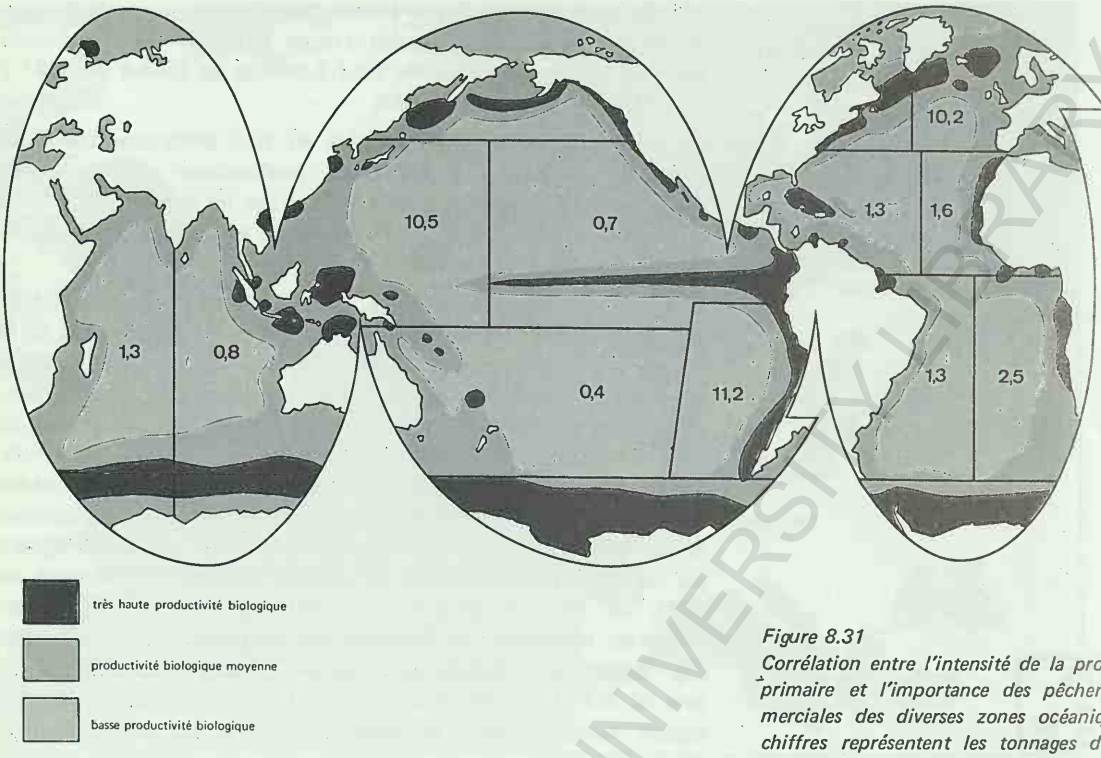


Figure 8.31
*Corrélation entre l'intensité de la productivité primaire et l'importance des pêcheries commerciales des diverses zones océaniques. Les chiffres représentent les tonnages d'animaux marins capturés en 1967 (*nec *Goldberg et coll.,* in *"Man's impact on terrestrial and océanic ecosystems", M I T Press, 1971, p. 383*

L'espèce dominante de ces colonies, rigoureusement protégée, est représentée par le cormoran de Bougainville *(Phalacrocorax bougainvillei),* lequel s'abstient de façon quasi religieuse de se nourrir d'autre chose que d'anchois ; à côté de celle-ci vivent de nombreux fous (*Sula variegata* et *peruviensis*) et des pélicans.

Le rapport du guano à l'économie péruvienne est de 5 millions de dollars alors que les pêcheries d'anchois lui procurent 320 millions de dollars par an (Paulik, 1971).

La baisse du rendement en guano résulte de la chute des effectifs des colonies d'oiseaux de mer, lesquelles sont tombées de 30 millions d'individus en 1955 à 5,4 millions en 1969 (fig. 8.32). Le maintien continu à un très bas niveau des populations d'oiseaux à guano constitue aux yeux de certains biologistes, le signe avant-coureur de l'épuisement des stocks de l'anchois péruvien. Le déclin des colonies aviennes présente d'ailleurs une assez bonne corrélation avec la croissance des captures de ce poisson (fig. 8.32), très rapide depuis le milieu des années 50 (1).

On ne doit pas manquer de souligner que la capacité de capture des navires de pêche péruviens est de 55 millions de tonnes par an, bien supérieure à la productivité biologique annuelle de l'espèce qu'ils exploitent.

(1) De récentes données semblent annoncer le déclin des pêcheries d'anchois. Les captures pour les premiers mois de 1972 n'ont été que de 4,2 millions de tonnes . . .

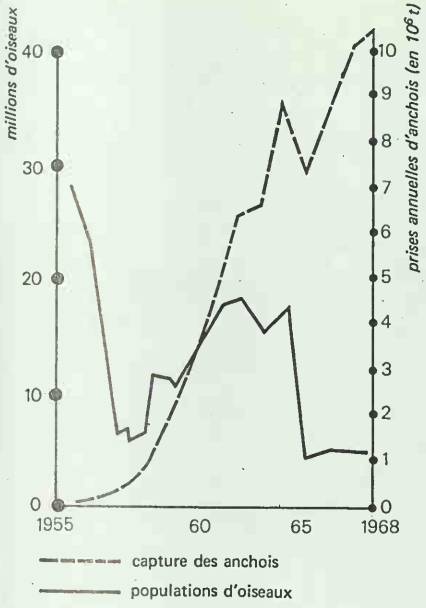


Figure 8.32
Variation des effectifs des colonies d'Oiseaux à guano et du rendement des pêcheries de l'anchois péruvien entre 1955 et 1968. D'après Paulik in *Murdoch "Environment, Resources, Pollution and Society", Sinauer 1971, p. 171*

Il serait aussi possible d'épiloguer sur la finalité de l'utilisation de cette gigantesque production protéique si l'on songe qu'elle s'écoule en majorité sur le marché Nord-Américain sous forme de farine de poisson destinée à l'aviculture. On mesure là le gaspillage insensé que cela représente, car les 9/10es de cette biomasse sont perdus au cours du transfert de l'énergie qu'elle renferme au niveau trophique supérieur . . . Au même moment, de nombreux habitants du Pérou sont carencés en protéines animales . . .

En sens inverse, il y aurait beaucoup à dire sur le raisonnement simpliste de bien des technocrates responsables des pêcheries qui suggèrent de multiplier par un facteur dix le rendement des pêcheries en descendant d'un niveau trophique. Cela est d'ailleurs en voie d'être entrepris dans le cas des crustacés pélagiques dont s'alimentent les baleines.

En réalité, l'écart de un à dix qui existe entre la quantité de nourriture disponible et la biomasse de poissons représente *pro parte* en dernière analyse la quantité d'énergie nécessaire pour prélever une masse de nourriture très élevée, certes, mais dispersée dans les eaux marines et pour la transformer en tissus ichtyens (Production "secondaire").

Se substituer aux poissons pour faire ce travail nécessitera une quantité d'énergie (combustibles) pour le moins équivalente sans être sûr que le gain économique compensera les coûts technologiques : envisagerait-on de se substituer aux abeilles pour récolter le nectar des fleurs ?

Par ailleurs, seule une analyse minutieuse permettrait de vérifier s'il est plus rentable d'utiliser ces aliments pour la mariculture que de laisser faire cette besogne par les bancs de poissons océaniques.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

CHAPITRE IX

Chapitre IX — Les limites des ressources de la biosphère 505
Limites énergétiques 506
Les ressources en matières premières 513
Les ressources en eau 514
Les ressources alimentaires 517

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

IX
LES LIMITES DES RESSOURCES DE LA BIOSPHERE

Parmi les innombrables éléments de la crise d'environnement dans laquelle est plongée notre civilisation, ceux relatifs au problème des limites des ressources de la biosphère figurent à la fois parmi les plus préoccupants et les plus controversés.

L'examen de cette question conduit à traiter de sujets aussi brûlants d'actualité que la finalité de la croissance ou l'impérieuse nécessité d'atteindre un état stationnaire dans les effectifs des populations humaines et leur niveau de production industrielle, sur le plan quantitatif cela s'entend.

Les écologistes déplorent hélas qu'en ce domaine, la plupart des discussions soient empreintes d'attitudes *a priori,* beaucoup plus fondées sur des considérations éthiques ou des interdits idéologiques que sur une approche rationnelle de problèmes cependant cruciaux pour l'avenir de notre espèce.

Il est vrai que la "découverte" récente par des hommes politiques occidentaux de l'existence de limites, connues depuis longtemps par les biologistes, à la capacité de l'écosphère, et les déclarations spectaculaires qu'ils ont cru devoir faire, à la suite de cette prise de conscience, ont passionné un débat qui n'en avait nul besoin.

La polémique qui s'en suivit culmina après la publication du rapport très technique de D. Meadows, *"The limits to growth"* (1972).

Cependant, le niveau de consommation actuel des sources d'énergie, de matières premières, d'eau et celui des besoins alimentaires atteignent une telle valeur absolue que l'on est surpris de constater l'étonnement de certains esprits qui soudain découvrent le caractère fini de l'écosphère !

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

LIMITES ENERGETIQUES

Parmi les diverses limites probables à l'expansion de l'activité industrielle humaine figurent les disponibilités énergétiques.

Deux types de sources d'énergie peuvent être utilisés par l'homme. Les premières, non renouvelables, comprennent les divers combustibles fossiles et les matières fissiles (Uranium 235 par exemple).

Les secondes sont par essence même inépuisables à l'échelle de notre espèce quoique plus difficile à mettre en œuvre. Il s'agit du flux solaire, des marées océaniques et du géothermisme.

Le flux d'énergie naturelle, constitué par l'ensemble de ces phénomènes cosmiques se répartit de la façon suivante, selon Hubert (1971) :

Flux solaire	$178\,000 \times 10^9$ kW
Géothermisme	32×10^9 kW
Energie marémotrice	3×10^9 kW

Seule une infime partie de ces gigantesques sources d'énergie est utilisée sous forme d'hydroélectricité. La satisfaction des besoins énergétiques de la civilisation contemporaine est essentiellement fondée sur l'emploi des combustibles fossiles. On a assisté depuis le début du siècle, époque où le charbon et le bois jouaient un rôle prépondérant, à une modification de la nature des carburants utilisés. La part du gaz naturel et surtout du pétrole n'a fait que croître au détriment des combustibles solides (fig. 9.1). Au

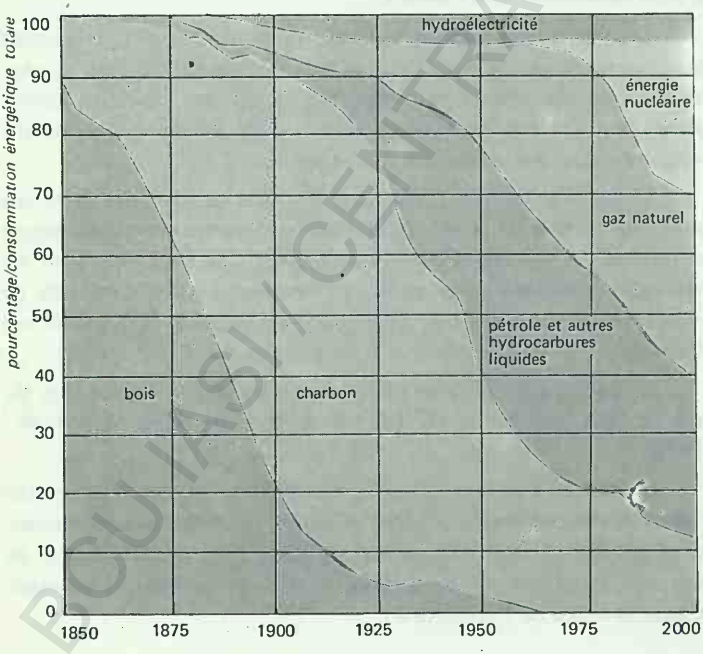


Figure 9.1
Evolution des diverses sources d'énergie utilisées aux Etats-Unis entre 1850 et la fin du XX^e siècle. On remarque le net déclin du charbon et la part grandissante des hydrocarbures liquides et gazeux qui resteront prépondérants jusqu'à la fin de ce siècle. D'après Cook, Scient. American, septembre 1971, p. 137

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

milieu des années 60, nous avons assisté à l'apparition de l'électronucléaire dont l'importance restera faible au cours de cette décennie. L'accroissement de consommation des produits pétroliers depuis une trentaine d'années est fort spectaculaire. Ainsi, la France n'avait besoin en 1939 que de 5 millions de tonnes de pétrole. En 1960, la consommation intérieure de notre pays s'élevait à trente millions de tonnes. Elle a atteint 100 millions de tonnes en 1972 et dépassera 180 millions de tonnes en 1980 !

En 1971, la production mondiale de combustibles fossiles fut de l'ordre de $7{,}5 \times 10^9$ tonnes d'équivalent charbon !

A l'image des populations, mais avec un taux d'accroissement supérieur, la consommation d'énergie augmente de façon exponentielle (fig. 9.2). De façon générale, le rythme actuel de cette croissance est celui du doublement décennal.

Dans le cas du gaz naturel par exemple, le taux d'accroissement de la production est de 6,57 % par an (temps de doublement 10,5 ans). Pour le pétrole, la moyenne est de 6,95 % entre 1857, date du début de son exploitation industrielle à Titusville, et 1965, soit un temps de doublement proche de dix ans.

Pour comprendre la signification absolue d'une telle boulimie énergétique, il suffit de penser qu'un homme né en 1970 consommera en 2040 — si les rythmes de croissance se maintiennent — cent vingt huit fois plus d'énergie qu'aujourd'hui. En termes de pétrole, cela veut dire que la France devra importer 1,28 milliard de tonnes de pétrole en 2042. Nul ne saurait prétendre que cela soit possible quand on songe simplement aux grosses difficultés

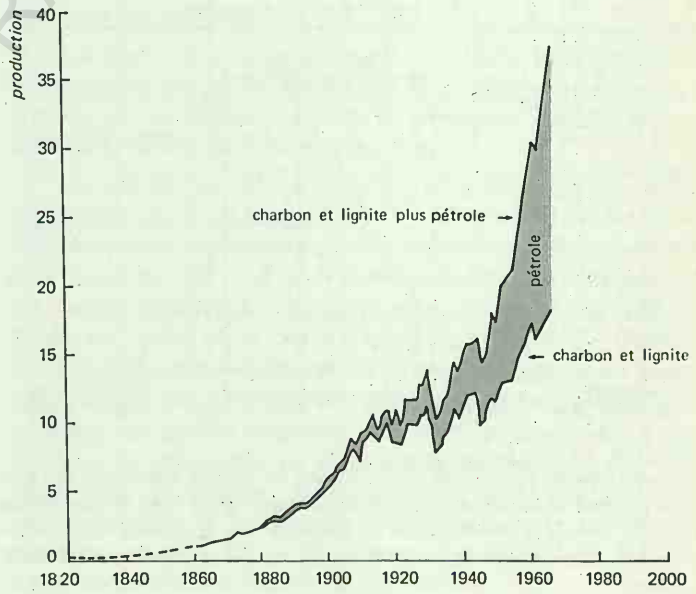


Figure 9.2
Croissance de la consommation mondiale de combustibles fossiles depuis le début du XIX^e siècle. D'après Hubbert, in *"Ressources and Man", 1969, Ac. Sci. US, Freeman ed., p. 163*

d'approvisionnement qui devront être surmontées d'ici la fin de la décennie actuelle. En réalité, la crise des ressources surviendra bien avant pour ce type de combustible —, on en a déjà des preuves que seuls des inconscients pourraient contester.

Les géologues considèrent d'ailleurs avec quelque ironie les propos de certains technocrates, voire de ministres, qui montrent une grave méconnaissance de la valeur réelle des réserves en combustibles. *"Depuis quarante ans j'entends dire qu'il n'existe que pour 17 ans de réserves de pétrole"*, s'exclamait voici quelque temps, lors d'une conférence-débat sur l'approvisionnement énergétique de notre pays, un ministre de l'Industrie . . .

Il est certes vrai qu'aucune institution humaine, tout au moins dans la Société contemporaine, ne se préoccupe réellement des conséquences de son activité au-delà d'un avenir supérieur à la décennie. . . .

L'évidence même suggère pourtant que les réserves en combustibles fossiles sont limitées.

On dispose de nos jours d'assez bonnes estimations de leur valeur (cf. le tableau LXVII et les figures 9.3 et 9.5).

Il faut distinguer les réserves prouvées de la quantité totale réellement existante. Seule cette dernière nous intéresse. Dans le cas du pétrole, les premières sont estimées à 80×10^9 tonnes réellement exploitables, soit 30 ans de la consommation mondiale de 1971 (2,5 milliards de tonnes), les secondes à une valeur située entre 1350×10^9 barils (*) et 2100×10^9 barils (**) selon les auteurs.

(*) Un baril = 159 l.

(**) Soit entre 216 et 336 milliards de tonnes.

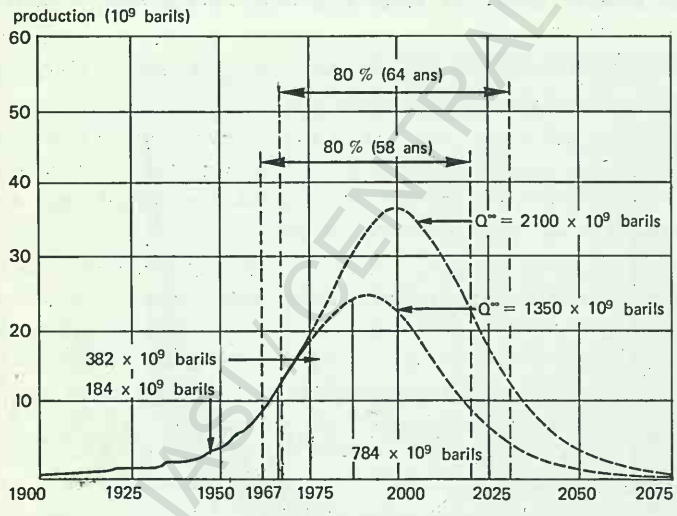


Figure 9.3
Estimation de la quantité totale de réserves de pétrole disponibles qui sont présentes dans la lithosphère. Remarquer la faible durée utile de cette source d'énergie évaluée à 64 ans dans la meilleure des hypothèses (Un baril = 159 litres). D'après Hubbert, in *"Ressources and man", Freeman ed. 1969, p. 196*

UCD IAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tableau LXVII — Réserves maximales en combustibles fossiles contenues dans la lithosphère (Hubbert, 1971)

Nature	*Quantité*	*Energie totale (en 10^{21} joules)*	*Pourcentage des réserves totales*
Charbon et lignite	$7{,}6 \times 10^{12}$ t	232	89,3
Pétrole	4×10^{11} m^3	14,8	5,7
Gaz naturel	$3{,}4 \times 10^{14}$ m^3	13,1	5,0
Total		259,9	100,0

Diverses considérations théoriques permettent de prévoir le cycle de production d'un combustible ou de n'importe quelle autre ressource minérale. Celle-ci s'ajuste sur une courbe en cloche de Gauss en fonction du temps (fig. 9.4). La production croît d'abord lentement, puis son rythme s'accélère, atteint un maximum et ultérieurement décroît de façon symétrique dans la seconde partie du cycle. C'est le phénomène bien connu de la loi des rendements décroissants.

La production totale du combustible au cours de l'histoire de son exploitation sera donnée par l'expression $Q_\infty = \int_0^\infty Pdt$ où P est le taux de production et t le temps.

Q_∞ s'obtient à partir de calculs et de raisonnements fondés sur des données géologiques, le début de la courbe par les statistiques de production (cent vingt ans pour le pétrole, quelques siècles pour le charbon). La connaissance du moment auquel a été ou sera atteint le maximum de production présente une importance fondamentale. Aux Etats-Unis, par exemple, Q_{max} du pétrole s'est situé vers la fin des années 60.

L'ère utile d'une source d'énergie considérée est constituée par l'intervalle de temps correspondant à la quantité comprise entre les premiers et les derniers 10 % de la production intégrée, soit aux 80 % de la surface de la courbe (fig. 9.4).

Dans le cas du pétrole, cette ère utile, selon que l'on adopte l'estimation faible ou forte du Q_∞ (fig. 9.3), durera 58 ou 64 ans. Autrement dit, nos enfants verront certainement l'épuisement de cette ressource. On peut dès à présent s'étonner de l'imprévoyance des nations industrielles modernes, dont l'économie est avant tout fondée sur l'usage d'une source d'énergie aussi éphémère. Quand on songe aux graves dommages causés à l'environnement et en particulier aux sites par l'implantation des unités pétrochimiques, et en omettant les graves pollutions qu'elles engendrent, on ne peut manquer de s'interroger sur l'incroyable gaspillage qui aura caractérisé l'ère du pétrole. L'environnement aura subi des pertes quasi-irréparables à la suite de l'usage par notre espèce d'une ressource naturelle qui ne lui aura servi que pendant moins d'un siècle, durée infime à l'échelle de son histoire.

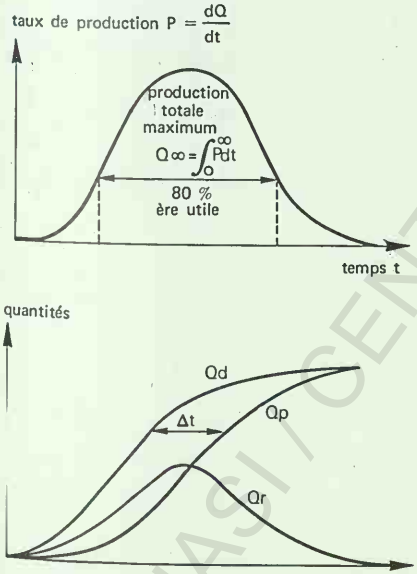


Figure 9.4
Théorie du cycle de production des matières premières. Qd = quantité disponible, Qp = quantité produite, Qr = quantité en réserve. D'après Hubbert in *"Ressources and Man" 1969, p. 168 et 172.*

EDUASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

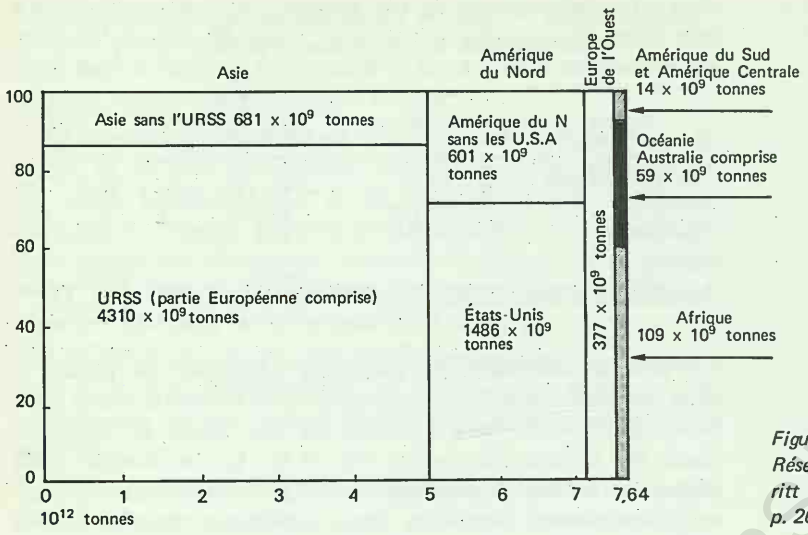


Figure 9.5
Réserves mondiales de charbon. D'après Averitt in Hubbert, "Ressources and Man" 1969, p. 203

La situation est certes moins préoccupante à l'égard des réserves en charbon. Avec un taux de croissance de la consommation évalué à 3,61 % par an, l'ère utile de ce combustible s'étend de l'an 2000 à 2400. Notons toutefois que l'URSS possède à elle seule plus des 3/5^{e} des réserves mondiales ! (fig. 9.5).

Cependant, même dans le cas du charbon, si l'on se place dans une perspective qui s'étend sur 5000 ans de part et d'autre de la période actuelle, il apparaît que l'époque de ce combustible aura été d'éphémère durée. En revanche, l'usage des carburants fossiles aura engendré les perturbations les plus drastiques jamais exercées sur l'ensemble des êtres vivants y compris l'homme.

Toutefois, ces diverses prévisions montrent que la crise énergétique mondiale n'est pas pour demain, même si localement — et tel est le cas des Etats-Unis — elle soulève des difficultés provisoires. En effet, quand le pétrole et le gaz naturel viendront à manquer, le charbon et l'énergie nucléaire prendront le relais. Malgré les prévisions d'épuisement des minerais d'uranium à forte teneur d'ici la fin du siècle, il sera possible d'utiliser des minerais moins riches. On pourra aussi recourir à d'autres matières fertiles comme le thorium qui serait dix fois plus abondant que l'uranium dans la lithosphère. Enfin, le développement rapide de nouvelles technologies, comme celle des réacteurs surrégénérateurs, accroîtra de plusieurs magnitudes l'ère utile des "combustibles" nucléaires.

Les plus grandes réserves s'imposent en revanche sur les possibilités concrètes de recourir à la fusion dans un avenir prévisible. Aucune solution pratique au confinement du plasma n'est, jusqu'à présent, en vue. En outre, Parker (1968) a signalé que les pertes de tritium, inéluctables même si leur taux est faible, provoqueraient une contamination prohibitive de l'environnement par ce dangereux radioisotope.

BLUMLEIN CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Une des principales limites à un accroissement substantiel de la consommation d'énergie par la civilisation industrielle est de nature thermodynamique. Elle découle du rejet dans l'atmosphère et les eaux des calories non converties en énergie utilisable. La caléfaction des fleuves dans un premier temps, les modifications climatiques locales dans un second (cf. Chapitre VI, p. 387) seraient prohibitives. Pour les Etats-Unis, on a pu calculer que la satisfaction des besoins électriques de ce pays en l'an 2000 élèvera à une valeur inadmissible (plus de 50° C) la température moyenne de tous les cours d'eau !

On ne peut d'autre part imaginer que toutes ces nouvelles centrales s'installent sur le littoral à l'avenir car celui-ci serait à brève échéance complètement défiguré par la prolifération de ces combinats industriels, version moderne et pacifique du Mur de l'Atlantique.

Ces diverses considérations prouvent aussi l'inéluctable nécessité d'atteindre à terme des taux de croissance nuls dans la consommation de l'énergie.

Une telle proposition peut être aisément démontrée par l'absurde, ainsi que l'ont fait Weinberg et Hammond à Oakridge (d'après Grenon, 1972). Ces auteurs se sont placés dans l'hypothèse d'une humanité stabilisée à 15 milliards d'habitants qui disposerait d'un budget énergétique double de celui des Etats-Unis à l'heure actuelle, soit 20 kW thermiques par personne.

A l'échelle globale, cela nécessiterait une puissance thermique installée colossale de 300×10^9 kW th. soit 60 fois la valeur actuelle. Un tel rythme de production énergétique épuiserait en 15 ans les réserves *existantes* (et non actuellement prouvées) de charbon et... en 3 mois celles du pétrole.

Seul, le recours aux réacteurs surrégénérateurs permettrait de répondre à une telle demande. Malgré cela, les nécessités d'approvisionnement en matières fertiles conduiraient à se tourner vers des gisements d'uranium et de thorium de très faible teneur. Des entreprises minières auraient pour tâche d'abattre de grandes montagnes et de les reconstituer après extraction de ces métaux ou de creuser des trous et de les combler au taux de plusieurs milliers de km^3 par an... Telle est la vision de ce futur "meilleur des mondes" énergétique.

De telles considérations suggèrent que seuls des insensés pourraient ne pas conclure à l'inanité des conceptions économiques actuelles fondées dans les pays occidentaux sur le mythe de l'expansion à tout prix. L'idéologie de la croissance quantitative est condamnée et, si notre civilisation ne veut pas le comprendre à temps, elle périra avec elle !

En conclusion, en sus d'un nécessaire plafonnement de la consommation d'énergie, la Société industrielle doit aussi repenser les modalités de sa production et de son utilisation. Le développement des transports routiers de fret — effectués d'ailleurs aux frais de la collectivité — constitue par exemple une source de gaspillage

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

d'énergie considérable, car il faut 7 fois plus de carburant par tonne/km dans le cas du transport routier que ferroviaire ([1]). Nous passons sous silence les dommages irréversibles infligés à l'espace rural et de façon plus générale à la nature par la construction de routes. L'emprise au sol du réseau routier, à capacité de transport identique, est supérieure d'un facteur dix à celle du chemin de fer ! Il est certes vrai que favoriser les transports routiers constitue dans notre Société une efficace manière de privilégier l'individuel au détriment du collectif...

(1) C'est une question de coefficients de frottement et de pénétration.

La seule solution écologique à l'approvisionnement rationnel en énergie de la civilisation moderne consisterait à ne point "entropiser" la biosphère par le recours aux combustibles fossiles ou nucléaires mais à fonder la production d'énergie sur sa seule source naturelle, le flux solaire. On pourrait, par exemple, imaginer que soient installées en des régions désertiques d'immenses batteries

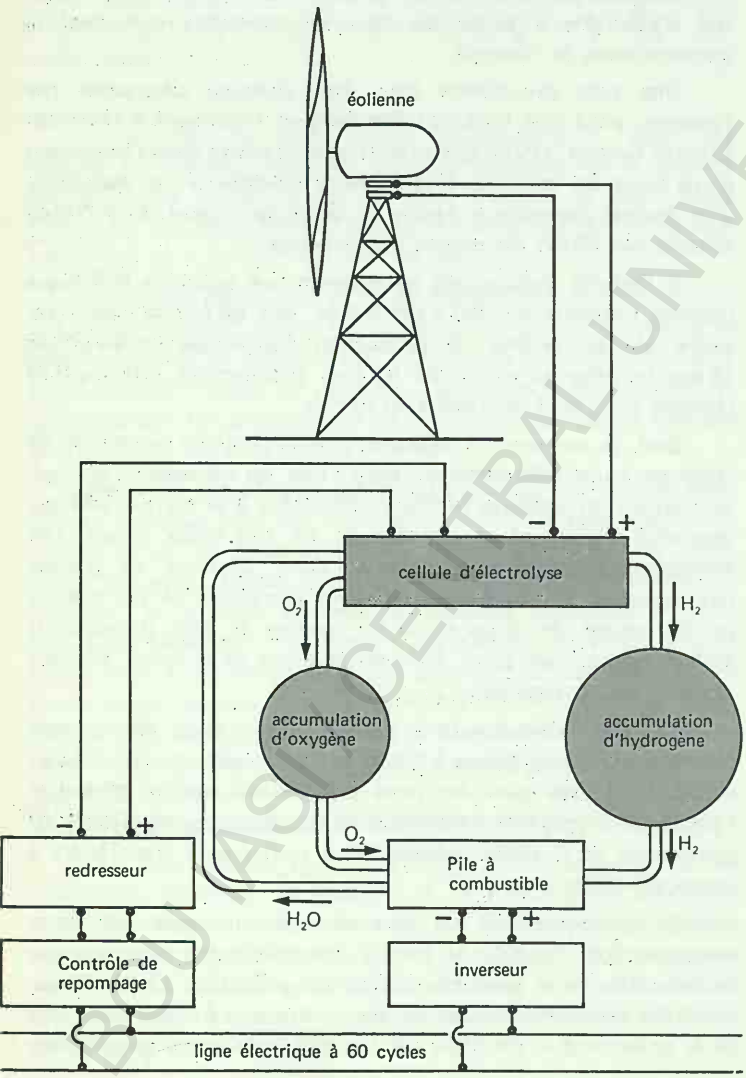


Figure 9.6
Projet d'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité. Le vent représente le type même d'une source d'énergie non polluante et dont l'usage serait rationnel sur le plan écologique, car il ne modifie pas le bilan thermodynamique de la biosphère, à la différence des combustibles fossiles et de l'énergie atomique. Le dispositif schématisé ci-contre se propose de pallier à son plus grave inconvénient lié à la grande irrégularité de sa force. L'énergie électrique produite servirait en partie à électrolyser de l'eau. L'hydrogène et l'oxygène seraient stockés et alimenteraient une pile à combustible qui serait mise en route par temps calme. D'après Summers, Scient. American, sept. 1971, p. 158

BOU ASU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

solaires ou des éoliennes gigantesques qui tireraient parti des colossales quantités d'énergie mises en œuvre par les vents (fig. 9.6). Le géothermisme constitue aussi une source énergétique inépuisable à l'échelle humaine.

Il faut donc déplorer le nombre restreint de travaux et les moyens dérisoires jusqu'à présent investis dans la recherche technologique en ce domaine [1].

(1) Le four solaire de Font-Romeu (France) est la seule réalisation pratique qui jusqu'alors utilise directement l'énergie solaire à une échelle semi-industrielle dans notre pays. Elle produit depuis novembre 1976 du courant électrique livré au réseau E.D.F. sous une puissance de 64 kw. Des projets de centrales à tour beaucoup plus puissantes, convertissant également l'énergie solaire en électricité par un procédé thermodynamique sont à l'étude ou en voie d'achèvement à l'heure actuelle. Dans ce type de centrale solaire, la chaudière est placée au sommet d'une tour sur laquelle l'énergie lumineuse est focalisée par un champ de miroirs dénommés heliostats. En France, le projet Thémis devrait donner prochainement 2 MW (el). Aux Etats-Unis, l'ERDA construit dans le désert de Mojave, à Barstow, une centrale de 10 MW (el) dont l'achèvement est prévu pour le début des années 80.

LES RESSOURCES EN MATIERES PREMIERES

L'estimation la plus exhaustive faite dans les années récentes sur les réserves mondiales en minerais indispensables a été l'œuvre de U.S. Bureau of mines (Flawn, 1966). La figure 9.7 résume ses principales données. On ne doit s'y référer qu'avec discernement car ces indications sont fort relatives. Quoi qu'il en soit, elles ne peuvent malgré tout conduire à un optimisme débordant. Elles suggèrent une pénurie possible en métaux non ferreux, qui concernera six d'entre eux avant la fin du siècle. Il faut cependant se garder d'émettre toute conclusion hâtive en ce domaine. Les progrès prévisibles de la technologie permettront de se rabattre sur des minerais de teneur bien plus faible que ceux actuellement exploitables. Enfin, le recyclage peut être dès à présent envisagé avec une haute efficacité pour la plupart de ces métaux usuels.

Dans de telles perspectives, la plupart des géologues considèrent que la question des approvisionnements en éléments simples constitue dans la majorité des cas un faux problème (Furon, 1967).

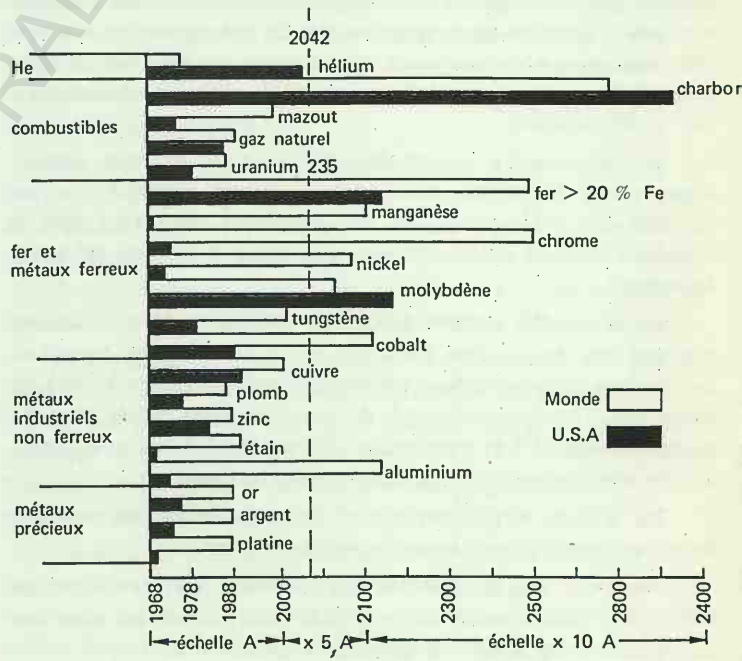


Figure 9.7
Réserves disponibles pour les vingt principaux minéraux indispensables à l'industrie moderne, aux taux actuels d'extraction. Le pointillé figure l'an 2042. Cette prospective ne tient pas compte des possibilités de faire appel à des minerais de plus faible teneur et a fortiori *de la mise en œuvre indispensable d'un recyclage de ces matières premières. D'après Cloud* in *Murdoch "Environment, Resources, Pollution and Society", Sinauer 1971, p. 73*

BRGM / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

LES RESSOURCES EN EAU

Malgré une apparente abondance, l'eau douce, compte tenu de la croissance des besoins humains, présente une relative rareté dans la biosphère.

A la différence de bien des problèmes de ressources qui ne deviendront cruciaux que dans un avenir plus ou moins lointain, celui des ressources en eaux douces est actuel. La plupart des pays industrialisés sont *déjà* victimes d'une grave pénurie, même ceux qui en paraîtraient *a priori* les mieux pourvus.

Si l'on prend en considération l'augmentation incessante des besoins en eau dans la civilisation contemporaine, en particulier des volumes énormes consommés par les nations en forte expansion industrielle, si l'on tient compte des quantités colossales d'eau nécessaires à l'agriculture (1) non seulement dans les pays développés mais dans ceux du tiers monde où une démographie galopante pousse à la mise en valeur de terres semi-arides à l'aide de l'irrigation, on en vient alors à conclure que l'eau fait déjà cruellement défaut en bien des régions du monde. Elle figure au tout premier rang des ressources naturelles susceptibles de manquer à l'humanité dans un avenir prévisible (Furon, 1963).

(1) Un hectare de maïs consomme 20 000 tonnes d'eau pendant sa période végétative. Ce volume est de 40 000 m^3 dans le cas d'une rizière.

Malheureusement, la mauvaise gestion, voire le gaspillage des ressources en eau sont aujourd'hui, au contraire, la règle dans les pays industrialisés. La pollution accidentelle ou par négligence des nappes phréatiques les plus profondes compromet l'avenir de nos réserves hydriques et empêchera leur utilisation quand le besoin s'en manifestera. Enfin, les ressources en eau sont également limitées par les exigences des consommateurs, lesquelles s'accroissent avec l'élévation des niveaux de vie. Ce phénomène est d'autant plus marqué que de nos jours les habitants des pays occidentaux exigent des eaux un degré de pureté qu'ils refusent bizarrement à l'air qu'ils respirent.

Si l'on examine maintenant non plus les volumes globaux d'eau douce disponible mais leur répartition géographique, on constate que cet élément est non seulement assez rare dans la biosphère mais en outre fort mal distribué à la surface des terres émergées.

Ainsi, sur 150 millions de km^2 de continents, 15 millions sont couverts par des calottes glaciaires et 22 millions sont constitués par des sols circum-arctiques perpétuellement gelés (permafrost), de sorte que 37 millions de km^2 de terres émergées situés dans les régions boréales (2) et australes ne peuvent servir à une quelconque activité agricole par suite des conditions climatiques.

(2) 22 % des terres de l'hémisphère Nord sont gelées en permanence.

Par ailleurs, 40 millions de km^2 de terres désertiques occupent les zones intertropicales ou subtropicales du globe.

Ainsi, sur plus de la moitié des continents, soit 77 millions de km^2, l'eau douce existe en quantités insuffisantes ou sous une forme inutilisable à des fins agricoles ou industrielles.

EDINBURGH UNIVERSITY LIBRARY

Une autre donnée illustre bien l'extrême inégalité de répartition des ressources en eau .

Lors de l'étude du cycle biogéochimique de l'eau (cf. chapitre I, p. 59), nous avons appris que 97 % du volume de l'hydrosphère correspondait aux océans. Seul, le 3 % restant est constitué par des eaux douces. Mais en réalité, les 3/4 voire les 5/6 selon certaines estimations sont inaccessibles à l'homme ; ils représentent la masse des glaces accumulées dans l'inlandsis antarctique, groenlandais et dans les autres territoires gelés de la planète.

Dans ces conditions, le problème de l'eau dans le monde apparaît d'autant plus crucial qu'il en découle deux autres éléments aux conséquences drastiques :

— le volume d'eau *disponible* est limité, si on le rapproche des normes de consommation actuelles dans les pays développés. Le volume global sur lequel l'homme peut compter, constitué par les eaux continentales et les nappes phréatiques est somme toute assez faible. Il a été estimé à 900 000 km^3 d'eaux douces dans les cas les plus optimistes. Certains experts trouvent ce chiffre exagéré. Hutchinson, par exemple, (cf. tableau p. 60) l'évalue à 250 000 km^3. En définitive, seule une petite fraction de l'hydrosphère, estimée tout au plus à 0,5 % de son volume global, est constituée par des eaux réellement disponibles pour l'homme.

— la masse hydrique *utilisable* est en fait encore plus restreinte et elle s'amenuise en outre de jour en jour par suite des pollutions. Celle-ci correspond à la quantité apportée par les précipitations aux eaux superficielles (ruissellement) et souterraines (infiltrations), soit "seulement" 25 000 km^3 par an pour les zones habitables des continents émergés [1] selon R. Furon (1963). En effet, une bonne gestion de l'eau interdit de puiser dans les fleuves et les nappes phréatiques une quantité supérieure à celle apportée chaque année par les précipitations sous peine d'entamer le capital hydrogéologique régional !

(1) Zones parabiosphériques exclues.

Le lac Baïkal, dans l'Extrême-Orient soviétique, long de 650 km et profond de 1700 m, renferme à lui seul 23 000 km^3 d'eau douce (Kozhov, 1963), soit 18 % du volume que représente l'ensemble des eaux courantes et des lacs du globe [2].

(2) En prenant pour estimation moyenne de ce volume 126 300 km^3, chiffre rapporté par Van Hylckama (1971).

A cette inégalité de ressource en eau s'ajoute une inégalité de consommation qui accroît le déficit de certaines régions du monde.

Aux Etats-Unis, la consommation moyenne était, en 1968, de 6100 l/jour/habitant, non compris les usages hydroélectriques. En réalité, on assiste dans les pays industrialisés à un incroyable gaspillage des ressources en eau. Ainsi, 90 % du volume des eaux fluviales nord-américaines servent à diluer des effluents et à transporter des déchets vers la mer !

De plus, certaines industries consomment des quantités considérables d'eau : 300 tonnes en sont nécessaires pour fabriquer une tonne de papier, 600 tonnes pour produire une tonne d'engrais azotés. Nous avons aussi cité l'ampleur des besoins agricoles.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Comme en bien d'autres domaines de l'activité humaine, la consommation s'accroît sans cesse et double tous les dix ans. Celle-ci était par exemple de 1500 m^3/an et par habitant aux Etats-Unis en 1966; elle atteindra 3000 m^3/an et par habitant en 1976 (Hylckama, 1971).

Dans l'hypothèse où la consommation française s'établirait sur les mêmes normes qu'aux Etats-Unis, nous aurions besoin dès à présent de 80 milliards de m^3 d'eau par an, soit la moitié du débit actuel de nos fleuves pour satisfaire cette demande. Cela est d'ailleurs déjà impossible à cause de l'état de pollution actuel de nos principaux bassins fluviaux. De plus, il est assez évident que toute l'eau de surface n'est pas utilisable car il faut prévoir celle qui est nécessaire à la production hydroélectrique et à la navigation fluviale.

A l'opposé des pays industrialisés, les faibles disponibilités hydriques caractérisent bien des pays du tiers-monde. Ici, l'eau douce n'est pas gaspillée, elle manque. L'aridité du climat et le faible développement technologique ne permettent guère à ces habitants de disposer de plus d'une centaine de litres d'eau par jour pour les usages agricoles.

Ce problème des ressources en eau indispensables au développement de l'agriculture dans les pays du tiers-monde nous montre à quel point il est difficile de répondre aux questions relatives aux limites de la biosphère. Aucune ressource ne doit être examinée en dehors du contexte général, c'est-à-dire indépendamment des autres éléments nécessaires à l'activité humaine.

Il existe en effet des phénomènes de contre-réaction, remarquablement mis en évidence au M.I.T. par les travaux de l'équipe de Meadows (1971).

Le cas de l'irrigation dans les pays sous-développés en fournit d'excellentes illustrations. La construction d'un barrage conduit tout d'abord à noyer des basses terres souvent fertiles, phénomène que l'on omet en général de prendre en considération dans le bilan définitif de l'opération. Mais surtout, ils s'accompagnent de divers phénomènes indirects qui atténuent les bénéfices escomptés. Les gigantesques barrages édifiées en Asie ou en Afrique (Volta, Kariba, Assouan) ont bloqué les limons et autres sédiments qui, autrefois, se déposaient lors des crues sur les terres riveraines inondées.

Ce phénomène, souvent accéléré par l'érosion des sols surpâturés sur les bassins versants présente deux graves conséquences.

Il tend à combler les retenues à une vitesse souvent supérieure à celle initialement prévue par suite d'une inéluctable sédimentation. Le barrage des Chemfas, en Oranie, s'envase à la cadence de 300 000 m^3 par an (Furon, 1963). En Grèce, le barrage de Strymon, qui irrigue les plaines de Serres sera comblé moins de 40 ans après sa mise en eau.

BOUVIER LIBRARY UNIVERSITY

Le cas du réservoir de Mangha, au Pakistan, est aussi fort démonstratif. Il devait servir pendant plus d'un siècle. La rapide croissance des populations riveraines a tellement dégradé les sols du bassin versant que l'érosion consécutive comblera l'ouvrage en moins de 50 ans (Brown et Finsterbusch, 1971).

Mais aucun exemple de tels effets de "feedback négatif" de l'accroissement des disponibilités en une ressource naturelle sur d'autres ressources tout aussi indispensables n'est à notre connaissance aussi suggestif que celui du barrage d'Assouan, sur le haut Nil.

Personne ne peut encore prévoir les conséquences résultant à long terme pour la fertilité des terres de la vallée du Nil de l'absence des riches dépôts alluviaux qui lors des crues de ce fleuve étaient abandonnés sur ces sols. Aujourd'hui, ces limons sont retenus en amont par le barrage.

D'autre part, l'accroissement des surfaces irriguées a été moindre que prévu car les pertes d'eau par évaporation et infiltration dans la retenue sont supérieures aux calculs des experts. Mais il y a beaucoup plus grave. Le gain indirect de production agricole qui provient de cet accroissement des ressources en eau douce est en grande partie compensé par un phénomène inattendu, les pertes en protéines animales liées à l'effondrement du rapport des pêcheries égyptiennes. La rétention des riches limons du Nil par le barrage a diminué *ipso facto* la teneur en sels nutritifs des eaux du fleuve. Il en est résulté une forte baisse de productivité primaire donc secondaire de la Méditerranée orientale (Maurin, 1970). En conséquence, alors que les pêcheurs égyptiens prenaient autrefois 30 000 tonnes de sardines et 40 000 tonnes de poissons littoraux par an, ces chiffres ne sont plus aujourd'hui respectivement que de 5 000 et 10 000 tonnes.

LES RESSOURCES ALIMENTAIRES

De tous les graves problèmes d'environnement qui caractérisent les temps présents, celui des disponibilités alimentaires est de nature à inquiéter les moins pessimistes des écologistes. Dans ce domaine encore, la crise n'est pas pour demain : elle sévit déjà depuis longtemps.

En 1963, la FAO estimait que 20 % des habitants du tiers monde étaient sous-alimentés et que 60 % d'entre eux souffraient d'une malnutrition liée à une carence en protéines animales (fig. 9.8). Plus d'un milliard d'êtres humains ne disposent pas aujourd'hui d'une alimentation suffisante (fig. 9.9). A l'heure même où nous écrivons ces lignes, sévit aux Indes une famine qui affecte au moins 20×10^6 personnes (Viratelle, 1973).

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

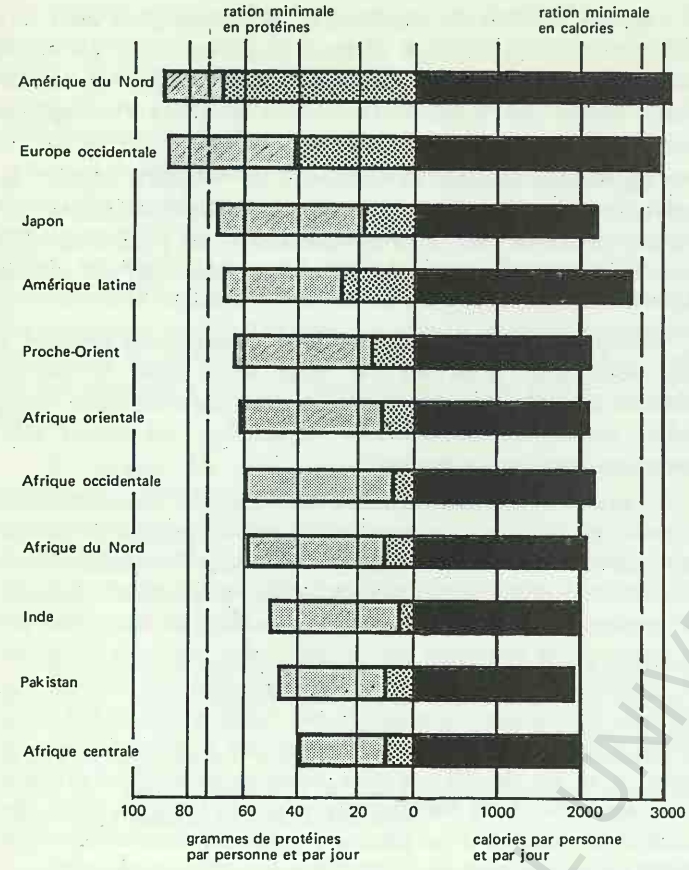


Figure 9.8
Valeur effective de la ration alimentaire en calories et en diverses protéines dans les diverses régions du monde. Les pointillés figurent la ration minimale considérée comme indispensable pour l'Américain du Nord. Remarquer la grave carence en protéines animales des pays africains, des régions semi-arides du Proche et du Moyen-Orient et du sous-continent indien. Notons aussi que les populations d'Amérique andine, non figurées ici, sont gravement carencées en protéines animales. D'après F A O, 1970

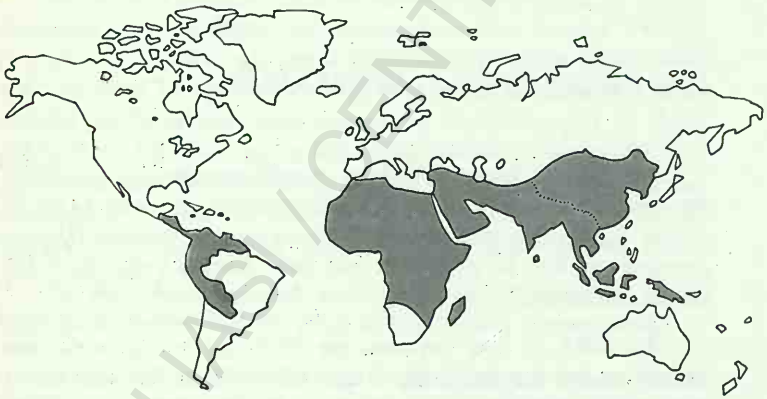


Figure 9.9
La malnutrition dans le monde. Sont figurées ici en grisé les régions où la ration alimentaire est déficiente et celles où manquent seulement les protéines animales. D'après U S D A.

EU IAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

En 1960, les traditionnels exportateurs de céréales que sont le Canada, les Etats-Unis . . . et la France, ont fourni au tiers-monde 13 millions de tonnes de grain pour faire face à la pénurie alimentaire. En 1966, 32 millions de tonnes furent ainsi expédiés au titre de l'assistance aux nations mal nourries. On ne dispose pas encore des données de 1972 qui seront certainement encore au moins à ce niveau, malgré la fameuse "révolution verte" dont la conception même ne peut conduire qu'à l'échec. Notons aussi que divers pays, comme les Etats-Unis, ne pourront répondre à l'accroissement de la demande à partir de 1985 (Fig. 9.10).

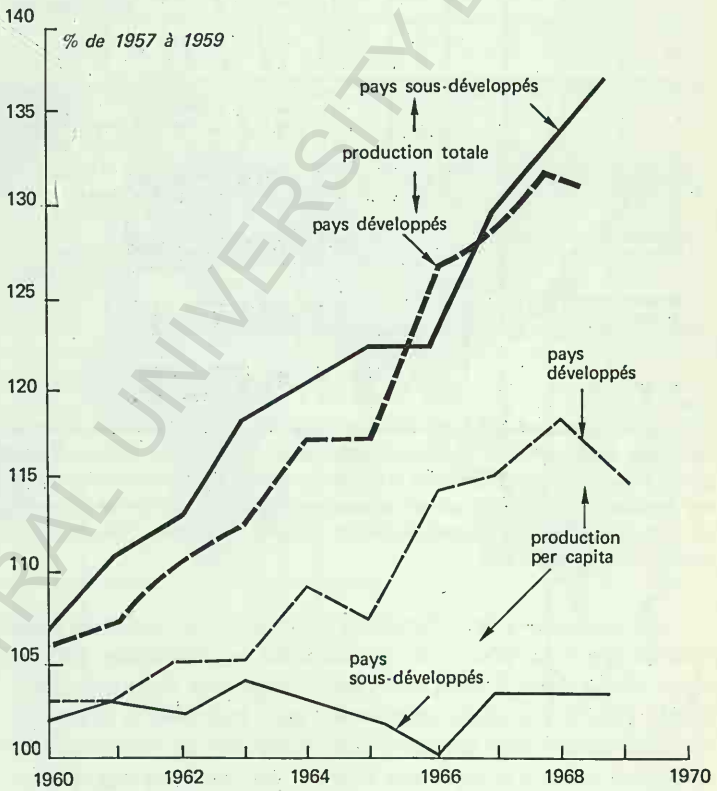


Figure 9.10
Evolution de la production agricole mondiale au cours de la dernière décennie. La production alimentaire par habitant a crû de 17 % pendant cette période dans les pays développés. Elle a au contraire stagné dans les pays du Tiers-Monde, malgré la prétendue "révolution verte". D'après USDA in *Brown et Finsterbusch, 1971*

De quelle superficie de terres cultivables peut disposer l'humanité ? Actuellement, toutes les terres fertiles ont été depuis longtemps défrichées. Les estimations les plus citées fixent à $3{,}2 \times 10^9$ hectares les disponibilités totales contre $1{,}3 \times 10^9$ hectares aujourd'hui cultivés. En réalité, cette évaluation de 32×10^6 km^2 paraît assez optimiste. Elle englobe des sols ferralitiques et des terres steppiques fragiles dont la mise en culture paraît aléatoire. Le coût de leur défrichement et de leur exploitation serait prohibitif dans les données actuelles si l'on voulait garantir leur pérennité par des mesures de conservation adéquates.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Un récent rapport de la FAO souligne d'autre part qu'*"en Asie méridionale, dans quelques régions de l'Extrême-Orient, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord ainsi qu'en certaines régions d'Amérique latine et d'Afrique tropicale... il n'existe pratiquement aucune possibilité d'augmenter la superficie des terres arables... dans les zones les plus sèches, il faudrait même reconvertir en pâturages naturels les terres dont le rendement est marginal ou submarginal"* (fig. 9.11 et 9.12).

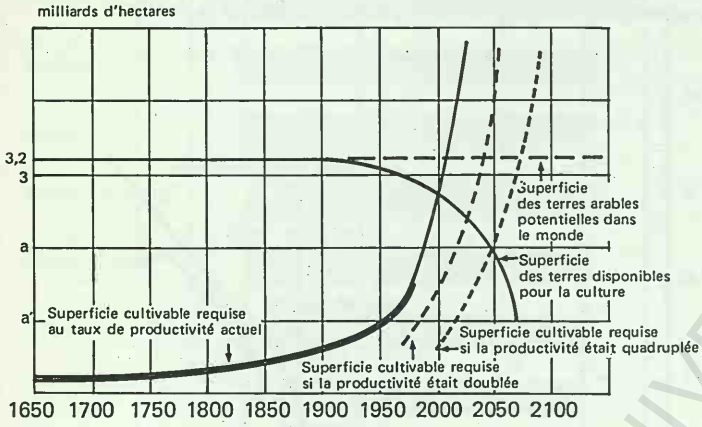


Figure 9.11
Prospectives sur l'évolution des besoins futurs en terres de culture et de la superficie réelle en terres cultivables disponibles. On voit que celle-ci décroît quand la population augmente car la croissance démographique conduit à retirer des étendues croissantes de sols des usages agricoles pour satisfaire les nécessités de l'urbanisation et de l'industrialisation. D'après Meadows, "The limits to growth" M I T Press, 1972, fig. 7

Le doublement des effectifs de l'humanité d'ici la fin du siècle signifie que l'on devra d'ici là accroître la production agricole d'une valeur égale à celle dont elle a augmenté depuis le Néolithique jusqu'à nos jours, simplement pour maintenir le niveau de nutrition actuel, déjà déficient dans l'ensemble de l'humanité! De nombreux facteurs antagonistes limitent une telle progression. Tout d'abord, la surface totale des terres disponibles pour la culture diminue en valeur absolue du fait de la croissance démographique. Cela résulte non seulement des altérations pédologiques et de l'érosion des sols, dont nous avons déjà traité, mais aussi des conséquences de l'expansion urbaine et industrielle. Ces dernières détournent des usages agricoles des surfaces croissantes de sols très fertiles [1] car les villes s'installent en général au fond de riches cuvettes alluviales. La croissance des cités se fait donc toujours au détriment des meilleures terres... d'autant plus que les plans de vocation agricole des sols sont rarement respectés, grâce au système dérogatoire bien connu chez nous (Saint-Marc, 1971). La surface de l'ensemble des villes du Monde est supérieure à celle de la France.

(1) Aux Etats-Unis, 400 000 ha par an de sol sont convertis à des usages non agricoles.

BOWLES GREEN UNIVERSITY LIBRARY

Elle a donc stérilisé le vingtième du total des terres aujourd'hui exploitées ! Il faut aussi ajouter à cela les routes, les aérodromes, les terrains militaires, l'inondation de vallées par de nouvelles retenues hydro-électriques... En définitive, la surface des terres disponibles décroît plus vite que la population n'augmente. Chaque personne, en sus de son logement, a besoin de sa surface de voies de communication, de local de travail, etc. (fig. 9.11).

On peut aussi montrer de diverses façons que la surface dont dispose chaque habitant de la Terre pour satisfaire ses besoins alimentaires (0,4 hectare par personne) est déjà insuffisante. La ration quotidienne du Français moyen est produite sur 0,9 hectare par exemple.

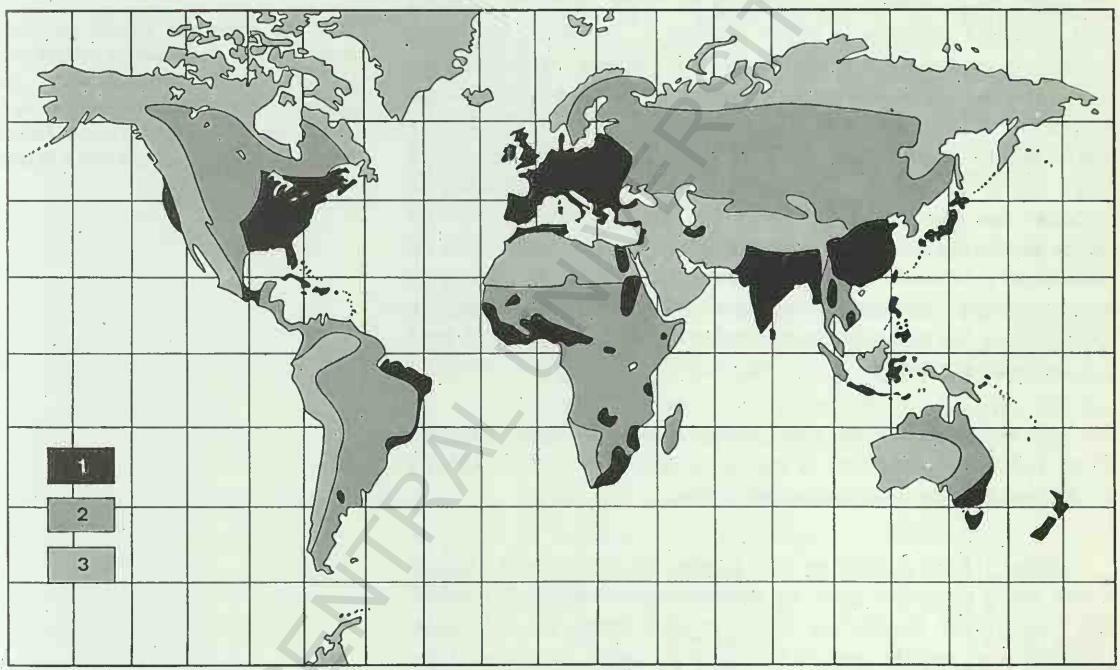


Figure 9.12
Disponibilités théoriques et réelles en terres cultivables dans le monde. En noir sont figurés les sols déjà exploités, en grisé (2)*, ceux qui pourraient l'être dans les perspectives les plus optimistes, compte tenu de progrès techniques encore du domaine de l'anticipation ; en grisé* (3)*, les zones inaptes à l'agriculture (48 % de la surface des continents).*
Les régions exploitées couvrent 12 % des terres émergées. Considérer que 40 % sont encore susceptibles d'être mis en culture (comme le suggérait p.e.C. Clark) revient à défricher des terres steppiques qui dans les données actuelles seraient rapidement la proie de l'érosion, des sols arides halophiles, et de vastes étendues de latosols ! Les plus grandes réserves doivent donc être faites à cet égard.
La mise en valeur des 30 x 10^6 km^2 envisagés par Meadows apparaît être un maximum et soulève déjà de sérieuses difficultés techniques sur le plan de l'Agronomie. D'après Petit, in *Derniers refuges, Elsevier ed., 1956, p. 26*

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

De nombreuses spéculations ont eu pour objet de calculer le nombre maximum d'habitants que la Terre pourrait nourrir. Certaines d'entre elles, assimilant la condition humaine à venir à celle qui prévaut en aviculture dans les élevages de poulets en batterie, ont conduit leurs auteurs à fixer des niveaux très considérables. Colin Clark (1959) met en valeur la totalité des continents à l'exception des zones hyperarides ou gelées. Il arrive ainsi à une surface globale de 82×10^6 km^2 de terres cultivables. En fixant à 2400 kcal/jour/personne la ration de survie, il prétend de la sorte nourrir (médiocrement, il est vrai) 140 milliards de personnes. Quand il adopte un régime alimentaire plus substantiel, comportant assez de protéines animales — viande et lait — il arrive à 45×10^9 habitants (1) Clark ne nous explique pas comment sera assurée la nourriture intellectuelle de ces êtres humains. Comme il rase toutes les forêts pour disposer du maximum de terres de culture, on voit mal comment produire le papier nécessaire. En outre, ses calculs supposent un rendement moyen de 55 quintaux de blé/hectare, bien supérieur au double de la moyenne mondiale actuelle. Aucun agronome ne peut dire comment atteindre un pareil rendement sur les 50 millions de km^2 de terres marginales, voire arides que Clark veut mettre en valeur. Enfin, cet auteur omet de prendre en considération l'accroissement des usages non agricoles des sols lié à ce poids démographique colossal. Faudra-t-il pour libérer tous les territoires cultivables loger cette humanité pléthorique dans les régions polaires boréales et australes ? Oublie-t-il qu'une population pareille nécessiterait l'urbanisation d'au moins 20×10^6 km^2 sur les bases actuelles ?

(1) Cette limite sera atteinte en un siècle au rythme actuel de croissance démographique. Il est remarquable que Meadows, à partir de considérations très différentes, fixe au bout de ce laps de temps l'effondrement de la civilisation si un terme n'est pas mis à la croissance.

Les propositions de Clark, malgré leur caractère utopique sinon fantaisiste, présentent le mérite de fixer une limite théorique au-delà de laquelle il est impossible d'aller.

Gates (1971) procède en sens inverse afin d'évaluer la capacité limite de la biosphère pour les populations humaines. Cet auteur fixe une ration énergétique riche et abondante, de 3000 kcal/personne/jour, assurée pour la simplicité du calcul uniquement par de la viande de bœuf nourri strictement au maïs.

La loi de Lindeman enseigne que 3 000 kcal/jour nécessitent 30 000 kcal de bœuf, elles-mêmes fournies par 300 000 kcal de maïs produits par transformation photosynthétique de 30×10^6 kcal d'énergie solaire. Supposons que les cultures se fassent dans une région recevant en moyenne 500 cal/cm^2 et par jour de flux solaire. La production des 3 000 kcal/jour nécessaires à chaque individu nécessitera 0,6 ha. Le calcul de Gates démontre d'une autre manière que la terre est déjà trop peuplée pour fournir à tous les hommes un régime alimentaire convenable en protéines animales car en réalité, en 1971, chaque être humain ne dispose plus en moyenne que de 0,38 ha de terre cultivable.

BOSTON UNIVERSITY LIBRARY

On ne peut guère espérer accroître la production agricole qu'en augmentant les rendements, donc les "stress" écologiques dont souffriront les milieux exploités par l'homme.

Même si l'on fait abstraction de la dégradation à long terme des terres marginales mises en culture et des pollutions associées à une agriculture industrielle intensive, d'autres limites associées à un accroissement substantiel de la production alimentaire mondiale commencent à être perçues. Celles-ci sont liées à la crise de l'énergie, à la raréfaction des matières premières fertilisantes, comme les phosphates dont l'agriculture contemporaine fait un très large usage, et au manque de ressources hydriques.

L'évolution de la consommation énergétique dans les agroécosystèmes constitue à l'heure actuelle un grave sujet de préoccupations pour les écologistes.

Le flux de l'énergie contrôle directement la productivité de la biosphère et les agroécosystèmes n'échappent pas à cette contingence, malgré une opinion bizarrement répandue chez le profane.

Autrement dit, la quantité de nourriture disponible *per capita* est en premier lieu sous la dépendance de la proportion du flux d'énergie propre à chaque écosystème que l'homme détourne à son profit pour répondre à ses besoins alimentaires.

A l'heure actuelle, la consommation d'énergie propre aux systèmes alimentaires des pays industrialisés est très considérable. Aux Etats-Unis, le secteur agro-alimentaire absorbe à lui seul de nos jours une quantité d'énergie nettement supérieure à la consommation totale de l'Inde qui compte quelques 650 x 10^6 habitants !

Le tableau LXVIII permet d'évaluer la part du bilan énergétique du secteur agro-alimentaire de quelques pays développés. Sa lecture

TABLEAU LXVIII — Consommation d'énergie propre au système alimentaire de quelques pays industrialisés (*nec* Slesser, 1975)

Pays	*Année*	*Consommation d'énergie*			*Rendement**	*ge Total de la consommation nationale d'énergie*
		par la production agricole en (10^{15} J)	*de la ferme à l'assiette du consommateur* (*en* 10^{15} J)	*Total annuel* (*en* 10^{15} J)		
Etats-Unis	1963	2 310	4 125	6 435	1/6,4	12
Grande-Bretagne	1972	340	340	646	1/6,5	10
Australie	1969	87	121	208	1/0,3	10
Israel	1969	33	ND	ND	1/1,5	20
RFA	1960	102	386	488	ND	12

(*) le rendement ou taux de conversion est le rapport entre la quantité d'énergie biochimique métabolisable, contenue dans la ration du consommateur et la quantité totale d'énergie (chaleur de combustion) des combustibles fossiles qui ont été nécessaires pour la produire et la conditionner.
ND = non déterminé.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

montre que leur système alimentaire est des plus énergivore puisqu'il correspond en règle générale à au moins 10 % de leur consommation totale d'énergie primaire.

Aujourd'hui, le contenu énergétique provenant de la conversion photosynthétique de l'énergie solaire est devenu minoritaire par rapport à la part d'énergie potentielle — provenant à l'heure actuelle des combustibles fossiles, demain des centrales nucléaires (via p.e. le chauffage des serres avec les basses calories) — "incorporée" aux aliments.

Supposons que la ration moyenne des français soit de 3000 Kcal par jour et que le rendement de notre système alimentaire soit le même qu'en Grande-Bretagne (1/6,4). Il est facile de calculer sur cette base que nous-même, en France, "mangeons" quelques 31 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an.

La part de la consommation énergétique du système alimentaire dans le bilan global croît également dans les pays industrialisés. Ce phénomène est non moins significatif, sur les plans écologiques et socio-économiques, que la croissance en valeur absolue de la quantité d'énergie nécessaire à la production agricole. Celle-ci atteignait aux Etats-Unis 20 % au total selon Steinhart et Steinhart (1974) dans la première moitié de cette décennie, contre 12 % en 1963 (tableau LXIX.

TABLEAU LXIX — Bilan énergétique exprimé en Kcal/ha de la culture du maïs aux Etats-Unis (D'après Pimentel et Coll., Science USA, N° 4111, Nov. 1973, p. 445).

Entrées	*Dates*		
	1945	1959	1970
Travail humain	30 900	18 800	
Machinisme	444 900	865 000	1 038 000
Carburant	1 343 000	1 789 400	1 970 000
Engrais azotés	145 300	850 000	2 325 000
Engrais phosphatés	26 200	60 000	116 000
Engrais potassiques	12 800	149 000	168 000
Semences	84 000	90 200	155 700
Irrigation	47 000	76 600	84 000
Insecticides	0	19 000	27 200
Herbicides	0	6 900	27 200
Séchage	24 700	247 000	296 000
Electricité	79 100	346 000	766 000
Transport sur rails	49 400	148 300	173 000
Total des Entrées	2 280 000	4 669 300	7 15 000
Rendement du Maïs	8 470 000	13 453 300	20 170 000
Rapport $\frac{\text{Kcal produites}}{\text{Kcal consommées}}$	3,71	2,88	2,82

En 1970, la consommation d'énergie nécessitée pour cultiver un hectare de Maïs atteignait 7,15 x 10^6 Kcal pour une production de 20,17 x 10^6 Kcal.

Il s'ensuit que le rendement énergétique de la culture (Rapport : $\frac{\text{Kcal produites}}{\text{Kcal consommées}}$ a effectivement baissé de 3,7 à 2,82 de 1945 à 1970.

Figure 9.13
Vue aérienne de culture par la technique du "central pivot irrigation system" dans le Nebraska. Les cercles visibles sur cette photographie correspondent à des champs de maïs ou de luzerne ayant un km de diamètre. Ce type d'agriculture ultra-industrialisée grande consommatrice d'engrais et de pesticides est de surcroît particulièrement énergivore (cliché F. Ramade).

BOUASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le bilan de la culture du Maïs (Pimentel et coll., 1973) apporte une estimation quantitative très précise de cette évolution (tableau LXIX.

Tant au niveau des exploitations agricoles qu'en aval de ces dernières (industries alimentaires et distribution des aliments) on constate que les substitutions de techniques opérées depuis 1945 ont systématiquement conduit à remplacer des procédés peu coûteux en énergie par d'autres beaucoup plus énergivores.

Le tableau LXVIII montre par exemple que dans la culture du Maïs, la seule consommation d'énergie liée à l'emploi d'engrais azotés est passée de 145 300 Kcal/ha en 1945 à 2 325 000 Kcal/ha en 1970. Entre ces deux dates, la consommation totale d'énergie par ha est passée de 7,15 x 10^6 Kcal à 20,17 x 10^6 Kcal pour cette culture.

De nouvelles techniques de culture, comme le "Central pivot irrigation system", permettant de faire croître cette plante en zones semi-aride (Nebraska occidental par exemple) ont conduit à des records de consommation énergétique à l'ha.

TABLEAU LXX – Evolution de la consommation d'énergie par le système alimentaire américain (valeurs exprimées en 10^{12} Kcal) D'après Steinhart et Steinhart, 1974).

Activité	*1940*	*1954*	*1970*
	Exploitations		
Carburant	70,0	172,8	232,0
Electricité	0,7	40,0	63,8
Engrais	12,4	30,6	94,0
Machinisme agricole	23,4	55,4	101,3
Irrigation	18	29,6	35
Sous-Total	124,5	328,6	526,1
	Industries alimentaires		
Activités de transformation des produits	147,7	216,4	314,0
Emballages papier	8,5	20,0	38,0
Emballages verre	14,0	27,0	47,0
fer et aluminium	38,0	73,7	122,0
Transport (carburant)	49,6	122,3	246,9
Transport (engins)	28	47,0	74,0
Sous-Total	285,8	506,4	841,9
	Commerciales et domestiques		
Réfrigération et cuisson commerciales	121,0	161,0	263,0
Machines correspondantes	10,0	27,5	61,0
Réfrigération et cuisson domestiques	144,2	228,0	480,0
Sous-Total	275,2	416,5	804,0
Total Général	685,5	1 251,5	2 172,0

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

A fortiori, la prise en compte depuis l'amont des exploitations (industries des tracteurs, des pesticides par exemple) des besoins énergétiques du système alimentaire, comme l'ont fait Steihnart et Steinhart (tableau LXX) montre une croissance très importante de la consommation globale d'énergie propre à ce dernier.

La lecture du tableau LXX montre que la consommation énergétique globale du système alimentaire américain est passée de 685×10^{12} Kcal en 1940 à $2\,172 \times 10^{12}$ Kcal en 1970. Encore les Steinhart précisent-ils qu'ils n'ont pas pris en considération les investissements énergétiques indirects liés au système de transport et de distribution des aliments.

2) Diminution des rendements énergétiques

Un paramètre très important pour l'analyse du flux de l'énergie dans les écosystèmes est constitué par le rapport de la quantité de Kcal produites (sous forme d'aliment consommable) par une culture (par hectares et par an) et de la quantité totale de Kcal nécessaire à la réalisation de cette culture.

Ce rapport quantité de Kcal produites/quantité de Kcal consommées, à l'opposé des rendements par hectare n'a fait que décroître au fur et à mesure de l'industrialisation de l'agriculture.

Pour le Maïs, ce dernier est passé selon Pimentel et coll. de 3.71 en 1945 à 2,82 en 1970.

On a pu calculer que la quantité d'énergie nécessaire pour produire 1 Kcal de Maïs dans les exploitations agricoles de l'Iowa est aujourd'hui 11 fois supérieure à celle utilisée en 1910 !

Plusieurs auteurs ont établi des diagrammes donnant les variations de rendement énergétique des cultures en fonction de la quantité d'énergie auxiliaire (et autre que le flux solaire) introduite.

La figure 9.14 représente la variation de ce rendement énergétique pour divers types de culture énumérés dans le tableau LXXI.

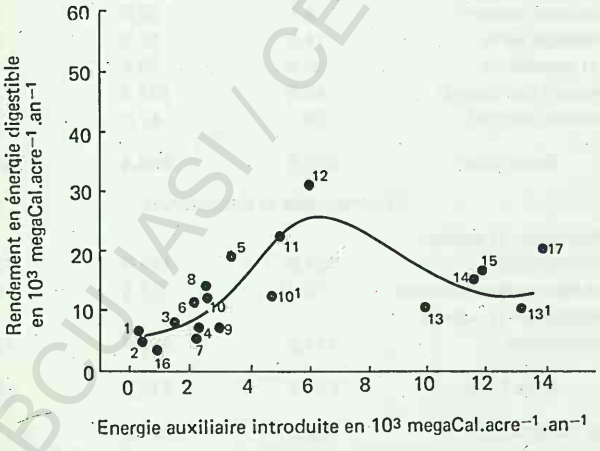


Figure 9.14
*Variation du rendement en énergie digestible produite par divers systémes culturaux en fonction de la quantité d'énergie auxiliaire introduite. On constate une baisse du rendement calorique au delà d'un optimum situé aux alentours de 6,3 x 10^3 mégacal/acre/an. (*in *Slesser, 1975).*
Les chiffres figurés correspondent aux divers types de cultures numérotés dans le tableau LXXI.
N.B. : un acre = 0,4 hectare.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

TABLEAU LXXI — Analyse du bilan énergétique de divers types de culture ayant servi à établir la relation des rendements énergétiques exprimés en fonction de l'énergie auxiliaire introduite (d'après Heichel *in* Slesser, 1975).

Niveaux d'industrialisation	*Culture*	*zone*	*Date*	*N° de code sur la figure*
I	Légumes	Nelle Guinée	1962	2
II	Riz irrigué	Philippines	1970	1
III	Maïs grain	Iowa	1915	3
	Id	Pennsylvanie	1915	4
	Maïs fourrage	Iowa	1915	5
IV	Luzerne	Missouri	1970	6
	Orge	Minnesota	id	7
	Sorgho	Kansas	id	8
	Soja	Missouri	id	9
	Canne à sucre (sans conditionnement)	Hawaï	1970	10
	Canne à sucre (avec conditionnement)	id	id	10[1]
	Maïs (grain)	Illinois	1969	11
	Maïs (silo)	Iowa	1969	12
IV	Betterave à sucre (sans conditionnement	Californie	1970	13
	Betterave à sucre (avec conditionnement	id	1970	13[1]
	Arachide	Caroline du N	1970	14
	Riz irrigué	Louisiane	1970	15
	Blé d'hiver	Montana	1970	16
	Pomme de terre	Maine	1968	17

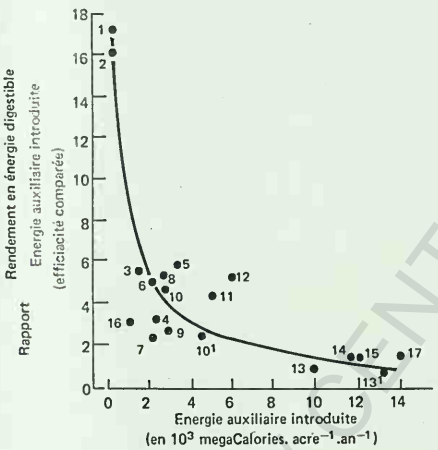


Figure 9.15
*Variation du rendement calorique relatif (Energie digestible produite/Energie auxiliaire consommée) en fonction de la quantité d'énergie auxiliaire humaine ou mécanique et chimique introduite). (*in *Slesser, 1975).*

L'examen de la figure 9,14 montre que le rendement de 14 mégacalories par hectare d'énergie digestible obtenu par les agriculteurs primitifs —de type néolithique— de Nouvelle Guinée n'est pas inférieur à celui des cultivateurs de Maïs de l'Iowa en 1915. Fait plus surprenant encore, cette figure révèle qu'au de là d'un optimum situé au niveau de 60 GJ/ha d'énergie auxiliaire introduite, le rendement en énergie digestible diminue !

La figure 9.15 constitue un autre mode de représentation des données précédentes. Le diagramme exprime la variation du rendement énergétique relatif (Kcal digestibles produites/Kcal consommées) en fonction de l'énergie artificielle introduite dans la culture. Cette figure montre que le rendement énergétique relatif (décroît de façon continue, en fonction de l'énergie auxiliaire utilisée, selon une loi hyperbolique.

En définitive, la pérennité d'une agriculture fondée sur les structures de productions qui lui sont propres, à l'heure actuelle, dans les pays développés exige —et c'est une condition impérative— la dispo-

BCU LAUSANNE / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

nibilité d'un approvisionnement en énergie inépuisable et bon marché.

En effet, il n'est pas exagéré de dire que la principale matière première de l'agriculture moderne n'est plus le sol mais le pétrole et ses dérivés !

Nous craignons dans de telles conditions que la raréfaction inéluctable des sources d'énergie classique, ne constitue dans le long terme un obstacle insurmontable à la progression, voire au maintien, de la production alimentaire mondiale qu'exige la démographie humaine !

Aujourd'hui, la nourriture de chaque citoyen américain requiert 0,566 ha et 0,425 TEP/an. Comme la population mondiale compte à l'heure actuelle environ $4{,}1 \times 10^9$ individus, elle nécessiterait la consommation de $1{,}75 \times 10^9$ TEP/an si l'on devait la nourrir selon les normes américaines —objectif avoué et non critiquable des responsables des pays en voie de développement.

Dans de telles conditions, si le pétrole constituait la seule source d'énergie utilisée en agriculture et si toutes les réserves existantes servaient uniquement à nourrir la population mondiale selon les méthodes Nord-américaines, elles seraient épuisées en 57 ans, en tenant compte de la centaine de milliards de tonnes de réserves prouvées à l'heure actuelle. Un calcul similaire effectué à partir de l'estimation la plus optimiste des réserves disponibles (et encore à découvrir) soit 300×19^9 t nous donnerait 170 ans.

En réalité, ce genre d'évaluation est des plus utopiques :

- on ne peut en aucune façon utiliser tout le pétrole extrait à la production alimentaire ;
- si l'effectif de l'humanité se stabilise à 15×10^9 individus, dans l'hypothèse d'une mise en œuvre d'un programme mondial de limitation des naissances, effectif qui paraît le plus probable selon les travaux de Frejka (cf. chap. II, p. 152), on voit que les ressources pétrolières globales seraient épuisées en une cinquantaine d'années pour nourrir une telle population.

En conclusion, le développement d'une agriculture industrialisée, grande consommatrice d'énergie potentielle n'est pas du tout assuré pour l'avenir. Dans le cas où les structures de production de type américain se généraliseraient, elles feraient planer à long terme un risque de pénurie alimentaire généralisée à la suite d'un épuisement des sources d'énergies disponibles.

Le maintien dans l'avenir de telles structures de production alimentaire ne pourra que s'accompagner d'une hausse des coûts de la nourriture consécutive à l'augmentation incessante et inéluctable du prix des combustibles fossiles et de l'énergie en général.

BCU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Pénurie en ressources hydriques et raréfaction des fertilisants

Comme dans tous les écosystèmes, le cycle de la matière dans les cultures dépend avant tout de deux séries de facteurs limitants : l'eau et les sels minéraux.

1) *Les disponibilités hydriques* représentent un obstacle essentiel à l'accroissement de la production agricole mondiale. Même dans des pays développés à climat tempéré comme les Etats-Unis et l'Union Soviétique, l'existence de zones semi-arides (déserts sonoriens froids, steppes et déserts d'Asie centrale) rendent aléatoire une augmentation importante de la production alimentaire par suite du manque en disponibilités hydriques et partant du coût excessif des systèmes d'irrigation.

Ceci est *a fortiori* valable pour nombre de pays du Tiers-Monde où dans les zones intertropicales chaque habitant ne dispose que de quelques hl d'eau par jour (en incluant les besoins d'irrigation) !

Or, les besoins en eau de l'Agriculture sont très considérables : un hectare de Maïs consomme par exemple 20 000 t d'eau pendant sa période végétative sous nos latitudes, une surface équivalente de rizière nécessite 40 000 m^3, au minimum au cours de sa saison végétative !

Exprimées en mm, donc directement comparables à la pluviométrie, les exigences de quelques cultures majeures sont les suivantes :

	hauteur en mm
Blé	365 à 760
Orge	360 à 700
Agrumes et Coton	500 à 600
Graminées fourragères	550 à 970
Betterave	700 à 900
Luzerne	820 à 910
Canne à sucre	400 à 950

Dans le cas de la mise en culture d'une zone désertique — par exemple de l'Impérial Valley en Californie, où il ne tombe guère que 75 mm par an, — c'est le chiffre supérieur qu'il faudra retenir puisqu'en zone aride l'évapotranspiration est maximale.

On voit que dans cet exemple précis, il faudra trouver quelques 5 500 m^3 par an d'eau pour cultiver le coton par exemple, 8 500 à 10 000 pour la betterave ce qui met en lumière les difficultés très considérables voire insurmontables, liées à l'accroissement de la production agricole dans des territoires où les conditions écologiques sont déficientes.

Par ailleurs, on est en droit de s'interroger sur la pérennité de la mise en valeur de certaines zones semi-arides dont le système d'irrigation est fondé sur le pompage dans des nappes phréatiques d'eau douce fossile. En effet, l'absence de renouvellement de ces eaux souterraines aboutira tôt ou tard à leur inéluctable épuisement.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Bien que nous développons plus en détail ce problème dans le chapitre VIII (p. 468) il faut aussi rappeler que l'irrigation peut mettre en danger certains sols lorsqu'elle est pratiquée sans précaution. Même dans des régions très développées comme la Californie, près d'un hectare de terre irriguée sur deux est menacée par la salification d'être transformée — et de façon irréversible — en solonetz, malgré toutes les précautions prises.

En effet, même dans les cas où des ouvrages de dérivation et l'édification de barrages de retenue permettent d'obtenir un approvisionnement en eau suffisant pour mettre en culture de vastes zones arides, la menace du sel constitue un danger d'échec permanent.

Les conditions climatiques propres à ces zones font que l'évaporation dans de telles retenues est souvent d'un litre d'eau par m^2 et par seconde. Ce phénomène, joint à la lixivation des sols arides des bassins versants conduit, à élever dès l'amont, au niveau du lac de retenue la teneur en sel des eaux destinées à l'irrigation des cultures.

Un autre facteur préoccupant, propre aux pays industrialisés, tient en la pollution des eaux de surface voire de nappes phréatiques importantes, par des produits chimiques toxiques et persistants, effluents de diverses industries ...

De sérieux incidents qui sont déjà advenus en diverses régions montrent combien ce danger devient préoccupant pour l'avenir car il peut sérieusement amenuiser, en rendant impropres pour l'agriculture d'importants volumes d'eau, les disponibilités hydriques.

Nous signalerons simplement à titre d'exemple, la contamination d'une nappe, dans le Colorado, près de Denver, qui, dès le début des années 60 conduisit à la destruction d'une importante surface de vergers irrigués par aspersion. Les eaux souterraines utilisées avaient été polluées, 70 km en amont, par des résidus de fabrication d'un défoliant, le 2, 4, 5 T produit par l'Arsenal des Montagnes rôcheuses !

Les radioécologistes, ont aussi évoqué, en date encore récente, les problèmes à long terme suscités par le rejet dans le Rhône d'effluents dilués provenant d'usine de retraitement des combustibles nucléaires, qui renferment du ^{137}Cs parmi d'autres dangereux radionucléides.

Comme dans le complexe absorbant des sols chaque gramme de Smectite peut adsorber 6 Curies de ^{137}Cs, on concevra quels dangers pourraient faire courir à long terme, pour la qualité sanitaire des productions horticoles de la Vallée du Rhône, l'usage d'eaux d'irrigation ainsi contaminées.

2) Les sels minéraux nutritifs

Toute augmentation spectaculaire de la production agricole implique, en l'absence de recyclage des résidus domestiques fermentescibles et du fumier, ce qui est le cas à l'heure actuelle, dans les

BOJANA CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

exploitations agricoles spécialisées de type industriel, un recours massif à la fumure minérale.

Bien que dans l'immédiat, les ressources en phosphate et potassium soient encore importantes et que la synthèse chimique des Nitrates exclut toute pénurie à court terme, la disponibilité de ces composés pour l'avenir n'est pas assurée et peut constituer une sérieuse entrave à l'augmentation de la production alimentaire mondiale.

C'est surtout pour les phosphates et les nitrates que les inquiétudes sont les plus justifiées.

La répartition géologique très localisée des phosphates jointe à leur relative rareté a permis aux pays producteurs de multiplier par quatre leur prix en 1974 et de nouvelles augmentations sont en vue ...

Mais en sus de cet aspect économique, la perturbation par l'homme technologique, du cycle biogéochimique du Phosphore soulève à long terme de très sérieuses inquiétudes.

Les usages agricoles des phosphates interdisent pratiquement toute possibilité de recyclage.

Malgré l'apparente importance des réserves estimées ($19{,}8 \times 10^9$ tonnes contenues dans des minerais ayant plus de 8 % de Phosphate selon l'US Bureau of Mines pour une extraction annuelle d'environ 12×10^6 tonnes en 1970) la situation est moins favorable qu'il n'y paraîtrait.

Au début des années 70, 39 % de la population mondiale (pays développés) utilisait 86 % des Phosphates extraits. Le seul fait d'amener l'ensemble des pays à ce niveau de consommation abaissait déjà à 675 ans la longévité des réserves disponibles à cette date.

Les effets conjugués de la croissance démographique et de l'augmentation nécessaire des disponibilités alimentaires *per capita* concourent à réduire de beaucoup les prévisions de disponibilité en phosphates.

Une étude empirique de la relation entre les rendements obtenus en fonction de la quantité d'engrais phosphatés utilisés montre (loi des rendements décroissants) que la consommation en engrais phosphaté augmente 2,7 fois plus vite que l'accroissement des rendements obtenus pour leur usage.

Cela signifie que la consommation de phosphate croît 2,7 fois plus vite que les effectifs humains — dans l'hypothèse où l'on voudrait simplement maintenir la disponibilité globale *per capita* —.

Dans les années 60, le taux de croissance annuelle de l'humanité était de 1,9 %/an et l'usage mondial d'engrais phosphaté a cru de 5,25 %/an ce qui donne un rapport de 2,76 confirmant sur des bases statistiques les résultats obtenus obtenus par l'expérimentation en plein champ sur la fertilisation chimique de diverses cultures.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Le tableau LXXII donne la corrélation entre les effectifs humains et les disponibilités futures en Phosphate.

TABLEAU LXXII — Durée estimée des réserves en Phosphates

Population (en 10^9 individus)	*Consommation de Phosphates* (en 10^6 t/an)	Durée des réserves connues (en années)
1,8	1,7	11 700
3,6	11,3	1 750
7,2	73	271
12	291	68
20	1 170	17

D'après Smith et coll. (1972).

Actuellement, compte tenu de la vitesse de croissance des effectifs humains et en supposant qu'elle se maintienne dans l'avenir, les réserves estimées seront épuisées en 90 ans.

Il apparaît donc que le gaspillage des engrais phosphatés, compte tenu de la relative faiblesse des quantités disponibles dans l'écorce terrestre, ne crée une sérieuse limitation à la production alimentaire mondiale.

De plus, il faut ajouter qu'un recours massif aux engrais phosphatés fondé sur l'application des techniques actuelles de fumure minérale conduirait à une dystrophisation catastrophique de toutes les eaux contientales avec toutes les conséquences imaginables pour la production halieuthique des eaux douces.

La seule limite à une augmentation de la disponibilité en Nitrates tient au coût futur de l'énergie. Il est notoire que la crise du pétrole à touché de plein fouet l'industrie des engrais nitrés.

En ce sens, la substitution systématique et aberrante de la fumure minérale à la fumure organique constitue une hérésie et un non-sens écologique. L'épandage de 25 tonnes par hectare de fumier nécessite encore 985 000 Kcal de carburant.

Une fumure minérale équivalente correspond à l'apport de 136 kg ha/azote, 34 kg/ha de Phosphore et 67 kg/ha de potasse. Elle nécessite 3 500 000 Kcal essentiellement pour la synthèse des nitrates qu'elle renferme soit 3 fois plus que la fumure organique. Nous ne nous étendrons pas de surcroît sur les innombrables avantages pédologiques liés entre autre à l'apport d'humus de cette dernière, qui fait défaut à la fumure par engrais chimiques.

En conclusion, on est dès à présent en mesure de se demander si le modèle occidental d'agriculture industrielle sera capable à long terme de répondre aux besoins alimentaires d'un nombre croissant d'hommes. Il s'agit d'une question lancinante si l'on prend en considération les effets dévastateurs de cette agriculture sur les grands équilibres écologiques.

BU JUSSIEU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

La question "combien d'hommes peut nourrir la Terre ? " est en réalité mal posée. Il faudrait plutôt dire quelles seront les conséquences pour la pérennité de la biosphère d'une intensification, grâce à la technologie moderne, de la production alimentaire globale ?

La réponse à une question ainsi formulée n'incite pas à l'optimisme. Nous avons déjà montré que le niveau actuel de production agricole provoque de multiples dégradations comme l'érosion des sols et l'eutrophisation des lacs sans parler de la pollution par les pesticides.

A la lumière des phénomènes déjà décrits dans cet ouvrage, il est douteux que les agroécosystèmes actuels puissent supporter *ad infinitum* les 6.7×10^9 individus prévisibles en l'an 2000 à partir des plus récentes données démographiques.

De tels faits plaident pour la mise en œuvre urgente d'un plan de stabilisation de la population mondiale qui conduirait à un spectaculaire ralentissement de la croissance démographique avant la fin du siècle. En réalité, le problème est non pas de définir le maximum mais l'optimum de population supportable par la biosphère. Certains auteurs dont la notoriété est incontestable n'hésitent pas, même, à avancer le chiffre de $1,5 \times 10^9$ habitants comme niveau limite compatible avec la pérennité des écosystèmes (Murdoch, 1971).

En nous plaçant dans cette hypothèse, après avoir atteint un maximum dans quelques décennies, les effectifs humains devraient décroître pour se stabiliser à une valeur nettement plus faible. Un tel processus ne peut être envisagé que dans une civilisation très avancée qui planifierait non seulement son économie mais sa démographie, comme le suggère Dobzhansky dans ses dernières publications. Cette éco-utopie, version futuriste de l'abbaye de Thélème, où tous nos semblables bénéficieraient d'un niveau culturel incommensurablement supérieur à celui que l'on connaît aujourd'hui ne deviendra réalité que si l'homme sait conserver un certain nombre de biocœnoses non dégradées pour le bonheur des générations futures. Nous en venons donc à traiter de l'urgente nécessité d'une protection de la biosphère et ce sera notre conclusion.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Il me paraît cependant que la crise de l'environnement et la banqueroute générale qu'elle laisse prévoir devraient nous contraindre à renoncer à certains luxes — et ce serait avant tout le luxe de la *politique* du profit que ceux qui peuvent en tirer bénéfice ont pu apprécier pendant si longtemps : le luxe qui fait qu'un très petit nombre de citoyens peut bénéficier d'une part disproportionnée de la richesse nationale, le luxe des privilégiés qui se refusent à informer la masse de leurs concitoyens de tout ce qu'ils devraient connaître pour pouvoir participer pleinement à la gestion des affaires publiques ; celui de frapper d'anathème toute tentative de remise en question de valeurs économiques établies et considérées comme fondamentales et de noyer tous les problèmes révélés par la logique de l'expérience dans les marécages des propagandes et des intérêts personnels.

B. Commoner : *The Closing Circle.*

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

X
LA CONSERVATION DE LA NATURE

UNE IMPERIEUSE NECESSITE: LA PROTECTION DE LA BIOSPHERE

La phase de développement aujourd'hui atteinte par l'humanité rend de plus en plus urgent un besoin de planification de l'espace naturel dont certains de nos semblables commencent d'ailleurs à ressentir la nécessité.

Ce processus est pris sous une acception plus large que celle où l'entend l'économie traditionnelle, limitée aux entreprises industrielles, à l'urbanisme et dans les cas les plus favorables à la mise en valeur de certaines ressources. Il s'agit d'une planification d'ensemble des secteurs privés et publics, de caractère multidisciplinaire, qui seule pourrait mettre un terme aux destructions des richesses naturelles ayant toujours caractérisé jusqu'à présent "l'aménagement" du milieu par les générations successives. La planification classique, univoque, est incapable *per se* d'assurer la remise en état d'une biosphère de qualité convenant à la vie de l'homme.

La préservation d'écosystèmes non dégradés et de régions naturelles vierges figurent au tout premier rang des tâches urgentes qui incombent à notre génération. Son importance est primordiale parmi les multiples impératifs qui conditionnent l'avènement d'une Société post-industrielle, fondée sur une planification écologique globale, dont l'apogée sera atteinte au cours de la prochaine phase de l'évolution humaine.

On pourrait se demander comment se justifie la protection de la Nature, même si une pareille question paraît inconvenante à la plupart d'entre-nous, et pourquoi faut-il soustraire des biocœenoses à l'action humaine ?

En réalité cette question mérite une réponse circonstanciée. De nos jours en effet, les "décideurs" n'en voient pas souvent la nécessité. Parfois même de méprisables personnages qualifient de "maniaques de la Nature" les scientifiques et bien d'autres citoyens

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

désintéressés qui osent compromettre par leurs propos et leur action les profits que certains tirent du pillage du milieu naturel au nom du "libéralisme économique". Il faut qu'on le comprenne enfin, la seule façon de rentabiliser la protection de la Nature, au sens où l'entend l'idéologie technocratique contemporaine, conduit à la ruine des écosystèmes que l'on feint de préserver.

Pourquoi doit-on se préoccuper du sort des organismes menacés ? Les arguments en faveur d'une telle proposition peuvent se ranger en plusieurs catégories. Ils sont de nature scientifique, économique et culturelle. Les raisons scientifiques sont multiples. De trop nombreuses espèces animales et parfois végétales ont été anéanties de diverses façons sans qu'aucun biologiste n'ait eu le temps de les étudier. Mais surtout, alors que l'homme est en train de bouleverser la majorité des milieux continentaux, il est absolument indispensable de conserver des témoins et cela dans l'intérêt des générations futures. Celles-ci auront certainement besoin des espèces raréfiées pour restaurer les milieux dégradés par l'imprévoyance de leurs ancêtres.

La sauvegarde du fond génétique végétal et animal de la biosphère est par ailleurs essentielle pour d'autres motifs tout aussi fondamentaux. Les plantes cultivées, les animaux domestiques, dérivent de génotypes sauvages. L'amélioration des souches sélectionnées par l'homme nécessitera, à un moment ou à un autre, un recroisement de ces dernières avec un de ces génotypes pour restaurer par exemple un caractère de résistance perdu à la suite d'une trop grande homozygotie. Ce sont les souches sauvages qui en raison de leurs caractéristiques très variées, nous offrent les plus grandes chances de découvrir les adaptations appropriées. Or ces souches ou races sauvages ne peuvent être cultivées dans les champs ou élevées dans des enclos sous peine de perdre rapidement leur variabilité. Elles doivent se perpétuer dans leurs communautés originelles, exposées aux vicissitudes de la concurrence inter et intraspécifique qu'implique l'existence dans une biocœnose non modifiée par l'homme. Cette sauvegarde du fond génétique mondial nécessite la conservation non seulement de spécimens mais de populations assez nombreuses d'espèces voisines car la valeur de chaque gène se définit par l'ensemble de la population des sujets entre lesquels ils sont librement échangés. La préservation de ce stock génétique jouera un rôle fondamental dans l'amélioration des plantes cultivées et des animaux domestiques. Ainsi, la création de races comme le mouton mérinos s'est faite par le passé en croisant des ovins domestiques avec des mouflons. Ce croisement n'aurait pu être réalisé si l'homme avait fait disparaître cette espèce. De même ont été créées des variétés de végétaux résistantes à des maladies cryptogamiques par croisement avec des génotypes sauvages.

BOSTON UNIVERSITY LIBRARY

Fig 10,1

La vallée des Bans, dans le Parc National des Ecrins. Dernier né des Parcs Nationaux français, le Parc des Ecrins protège un remarquable ensemble de hautes-vallées alpines dont la flore et la faune sont d'un intérêt exceptionnel. La protection des grandes espèces d'oiseaux et de mammifères qui y vivent demeure néanmoins précaire lorsque l'on songe que moins de trois ans après sa création, le tir des chamois y a été autorisé I Cliché F. Ramade.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

"La recherche de produits chimiques et médicinaux parmi les milliers d'espèces végétales et animales sauvages permettra de faire des découvertes retentissantes. Si les écosystèmes représentatifs de toute nature ne sont pas protégés, qui sait si une substance plus efficace que le pyrèthre ou la pénicilline ne disparaîtra pas de la terre avant d'avoir été découverte", écrivent Cain et Sokholov (1970).

Il est en outre surprenant de constater que la civilisation humaine utilise pour l'agriculture et l'élevage un nombre fort réduit d'espèces domestiquées pour la plupart dès le Néolithique : quelques centaines de plantes et quelques dizaines d'animaux. La majorité de la production agricole est assurée tout au plus par une vingtaine d'entre elles. Depuis plusieurs millénaires, les générations successives ont cherché à améliorer ces souches sans essayer de tirer parti du reste de la faune et de la flore. Nos descendants sauront certainement utiliser mieux que nous ne faisons aujourd'hui cet énorme potentiel, à condition que nous assurions sa survie.

Le cas des grands ongulés africains illustre parfaitement la nécessité des mesures de protection. Les Européens se sont acharnés à promouvoir sur ce continent l'élevage des bovins, mal adaptés aux conditions écologiques tropicales, même dans le cas des races autochtones. Diverses recherches ont montré que les antilopes utilisent mieux le couvert végétal et sont de plus résistantes à de nombreuses parasitoses fatales au bétail. Protéger ces espèces paraît donc indispensable pour l'avenir de la production animale sur le continent africain.

Mais d'autres arguments tout aussi convaincants en faveur d'une rigoureuse conservation de la Nature et de sa faune peuvent être évoqués.

Tous les écologistes connaissent parfaitement le rôle primordial de la diversité d'un milieu, première garante de son homéostasie. La préservation de nombreuses biocœnoses intactes constitue le contrepoids indispensable à l'action uniformisante, au nivellement des communautés vivantes, dont est responsable la civilisation contemporaine. Ne l'oublions pas, la Société moderne porte en elle les germes du génocide, elle banalise inexorablement, ce qui la conduit au rejet ou à l'élimination de tout ce qui est différent.

Quel honnête homme ne s'interroge devant la crise morale de l'Occident, dont le phénomène de la drogue constitue une des séquelles les plus spectaculaires, ou sur le rôle psychique pernicieux de ces *paysages minéraux, à la fois abiotiques, infiniment tristes et laids* auxquels Grassé (1970) compare les grandes cités modernes ?

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

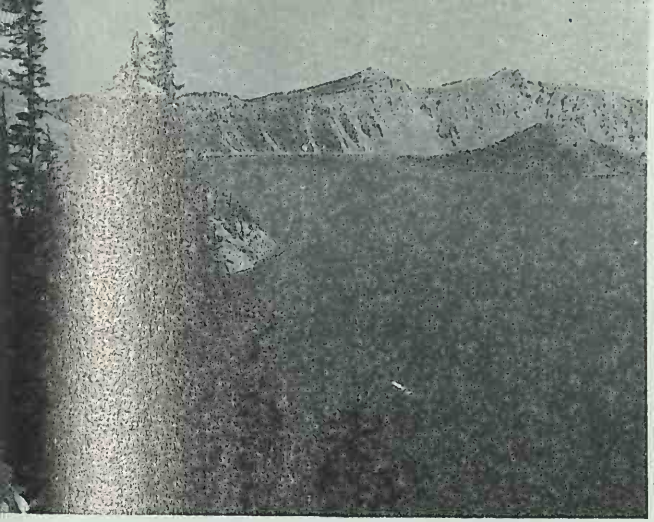
La conservation de la Nature apparaît alors comme une urgente nécessité pour la santé physique et morale des populations urbaines. Est-ce un hasard si dans les pays industrialisés, tous les hommes n'attendent plus que le "weed-end" pour se précipiter vers l'espace rural ou les rivages marins ? ' *"De l'air, de l'air ! ce cri est devenu celui de notre humanité qui étouffe dans sa prison et qui réclame de l'oxygène... de nos jours, le tourisme se prescrit comme une thérapeutique"*, écrivait dès 1956 Zermatten. Cet irremplaçable rôle récréatif de la Nature fut d'ailleurs le motif historique de la fondation aux Etats-Unis du plus ancien Parc National du Monde, celui de Yellowstone dans le Wyoming, consacrée par la loi du 1er mars 1872, afin de conserver cette région *"as a public park of pleasure ground for the benefit and enjoyment of the people"*. Le mouvement de défense de la nature s'est depuis considérablement amplifié, et le tourisme constitue un des éléments les plus efficaces en sa faveur car le plus mobilisateur. Il met aussi en évidence, mieux qu'aucun autre argument, l'aspect rentable de la protection de la Biosphère même au sens où l'entendent les plus bornés des économistes.

Aux Etats-Unis, l'ensemble des parcs nationaux fut visité par 22 millions de personnes en 1946, par 72 en 1960 et par 150 en 1970. L'intérêt manifesté par ce vaste public pour les sites vierges qu'ils préservent commence à soulever des problèmes d'érosion humaine dans les plus fréquentés d'entre eux. L'expansion du tourisme dans les remarquables réserves de l'Est africain fut encore plus grande au cours de la dernière décennie et a apporté à ces pays un chiffre d'affaires fort honorable.

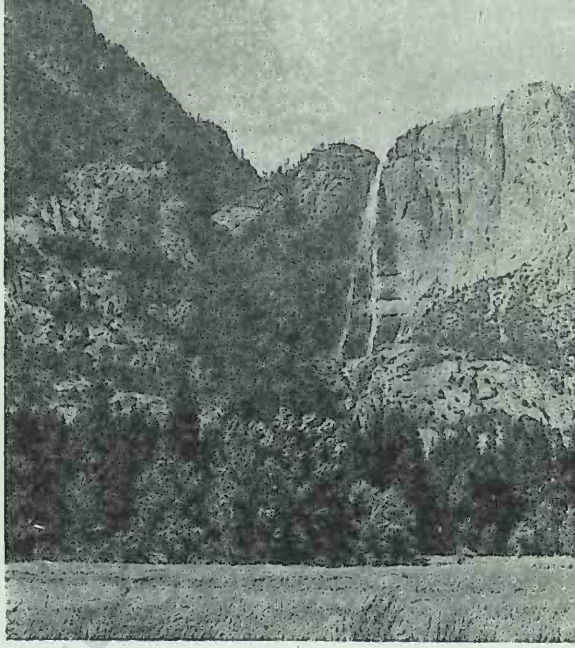
Malgré l'importance de ces diverses considérations socio-économiques, la protection de la Nature nous paraît encore plus indispensable à la suite de son irremplaçable rôle esthétique, culturel et éducatif. Les splendeurs de la vie sauvage intéressent une fraction de plus en plus large du grand public. Nous en prendrons comme exemple l'incessante croissance du nombre d'adeptes de la chasse photographique et mieux encore le succès sans précédent des publications de la grande presse consacrées à la flore et à la faune, témoin du vif intérêt que porte de plus en plus le profane au milieu naturel. Les éditions populaires ont su rapidement mettre à profit cette récente prise de conscience de la valeur esthétique et culturelle du monde vivant.

Que dire alors de l'implacable nécessité, pour le développement sensoriel de l'enfant, du contact enrichissant avec un milieu naturel non dégradé ? Quel insensé pourrait en nier l'irremplaçable valeur pour l'épanouissement intellectuel de l'individu ? Il n'est pas fortuit que l'univers psychologique de l'enfant soit de nos jours encore peuplé d'animaux.

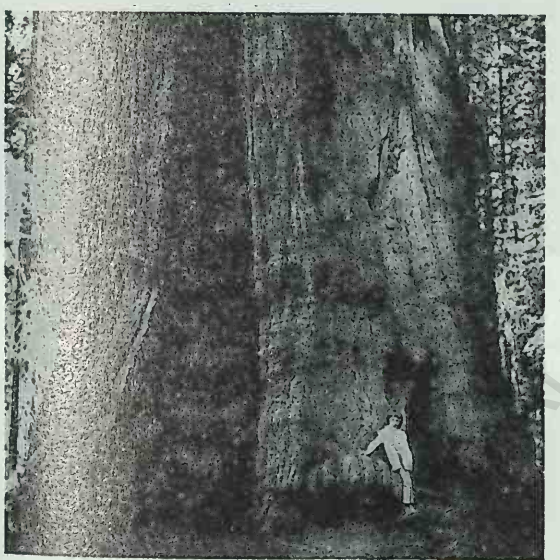
Planche XXIX
Protection de la nature aux Etats-Unis (clichés F. Ramade).
1) Le Parc National de Crater Lake (Oregon), aussi vaste que celui de la Vanoise, doit son nom à l'existence d'un lac de cratère d'une dizaine de kilomètres de diamètre et profond de plusieurs centaines de mètres. C'est le type même du lac oligotrophe : ses eaux d'un bleu profond sont d'une grande pureté. Les pentes du volcan éteint sont couvertes de magnifiques forêts vierges de conifères où dominent le sapin shasta (Abies magnifica shashtensis), *l'Hemlock de montagne* (Tsuga mertensiana) *et, dans les biotopes plus secs, le lodgepole pine* (Pinus contorta).
2) La cascade de Yosemite (Californie) figure, avec ses 750 m de dénivelée, parmi les plus hautes du monde. C'est une des nombreuses merveilles naturelles que protège le parc, vaste de plus de 300 000 hectares.
3) Le Parc National des Sequoias a été créé en 1890 pour soustraire la plus antique forêt du monde à la rapacité des compagnies forestières qui en avaient entrepris l'"exploitation". Il abrite en effet un boisement de Sequoia (Sequoiadendron giganteum) *arbres reliques secondaires dont certains exemplaires sont trimillénaires. Ici est figuré le "général Sherman" âgé de 3 500 ans, haut de près de 100 mètres et dont le tronc atteint 8 mètres de diamètre. Avec ses 1 500 tonnes, il constitue le plus gigantesque végétal vivant.*
4) Les Jardins du Diable (Utah) représentent une des plus étranges curiosités naturelles du parc national des Arches. Entre des falaises ruiniformes de grès rouges s'étendent des cuvettes sablonneuses dans lesquelles croissent des formes végétales caractéristiques des zones froides des semi-déserts sonoriens. On y observe une forêt pygmée de génévriers géants de l'Utah, dont certains exemplaires dépassent 8 mètres de haut. Remarquez au premier plan à droite des agaves aux feuilles acérées.
5) Le Grand Canyon du Colorado (Arizona) présente un intérêt écologique au moins comparable à celui qu'il éveille chez le géologue. Du sommet du plateau de Kaibab (dans laquelle sont taillées ces fantastiques gorges) au bord du fleuve, on observe une étonnante zonation verticale des principales communautés vivantes nord-américaines, depuis celles de la taïga canadienne jusqu'aux biocœnoses inféodées aux déserts chauds sonoriens.
6) Le Parc National de Yellowstone symbolise mieux qu'aucun autre le rôle des Etats-Unis dans la promotion du mouvement contemporain pour la protection de la nature. Fondé en



1



2



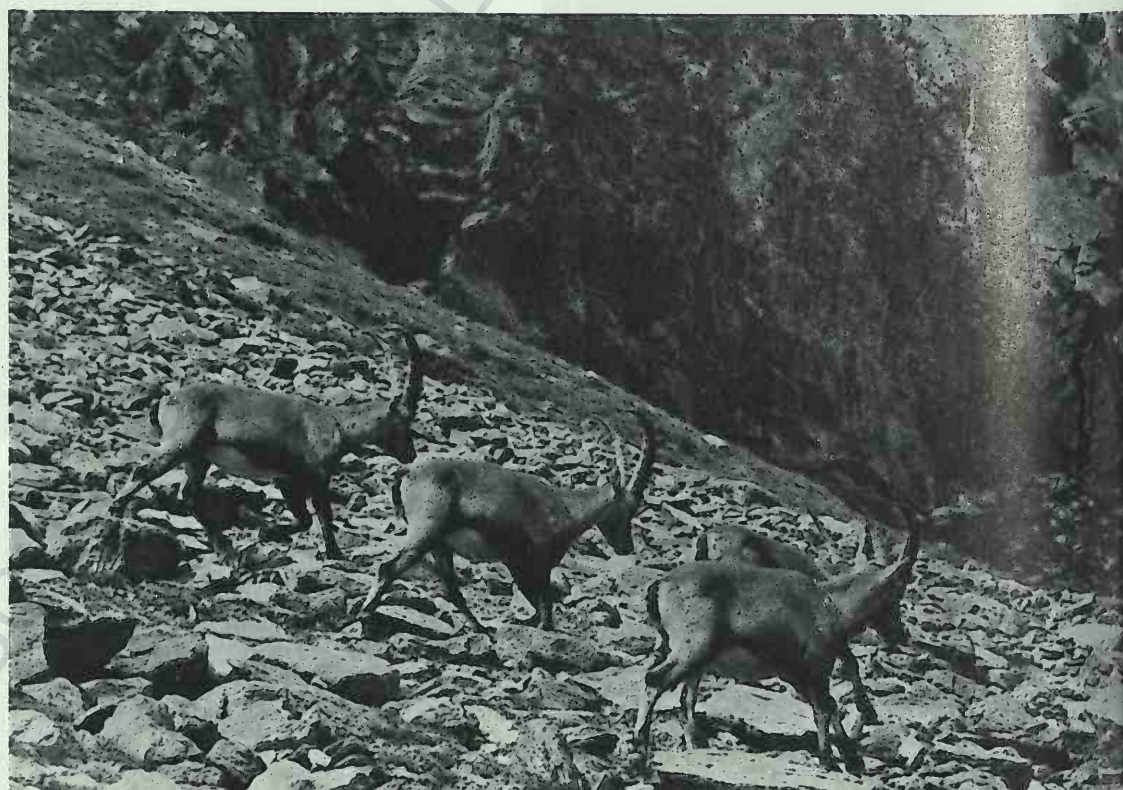
3

4

5

6

2



1872, c'est le doyen des Parcs Nationaux modernes. Ici est figurée une vue du bassin de Geysers de Norris lesquels représentent pour le grand public la plus fascinante des curiosités naturelles que préserve ce parc.

Planche XXX

Le Parc National de la Vanoise, le premier des parcs nationaux français créé en 1963, avait pour but initial de protéger ces milieux de haute montagne d'une grande richesse floristique et faunique. Seule l'expérience permettra de confirmer si la conception qui prévaut actuellement dans notre pays, et fait avant tout des parcs et réserves naturelles un instrument de promotion du tourisme régional, est capable d'assurer la pérénité de ces exceptionnels ensembles vivants. Il importe cependant de préciser qu'aucun parc national français ne possède un statut vraiment conforme à la règlementation édictée par l'UICN.

1) Panorama du Massif de la Vanoise, au dessus de Pralognan. On distingue au second plan la forêt de l'Isartan, domaine privilégié du tetras lyre et dans le fond, le sommet de la Grande-Casse, point culminant du parc (3 852 m). (cliché F. Ramade)

2) Le bouquetin (capra ibex) *est le plus grand des mammifères qui peuplent aujourd'hui le Parc de la Vanoise. La protection totale dont bénéficie cette espèce lui a permis de multiplier par quinze ses effectifs au cours de la dernière décennie. (cliché I. Földi)*

Tous ceux qui se sont penchés sur ces questions psycho-pédagogiques n'ont pas manqué d'être impressionnés par la proportion écrasante, parmi les grands esprits qui ont marqué l'histoire de l'humanité, du nombre de ceux dont l'enfance s'est écoulée en intime contact avec la nature, depuis Léonard de Vinci jusqu'à Tolstoï, Pasteur ou Einstein... On éprouve aussi quelque angoisse quand on songe aux "vertus de robots" qui pourraient être celles des nièmes générations d'individus, dont l'essentiel de l'existence, au cours du troisième millénaire, sera vécue dans les gratte-ciel des Mégalopolis inhumaines que se proposent déjà d'édifier certains urbanistes contemporains.

Lorsqu'il fait le bilan des motifs de crainte et d'espoir pour l'avenir, le biologiste pourrait être enclin à prendre une attitude négative et à s'abandonner au découragement. Mais les temps ne sont point à la passivité. Divers faits récents montrent que les populations des pays industrialisés commencent à percevoir la crise de l'environnement. Face à la marée montante de l'obscurantisme et à la cupidité d'une société dont la seule devise est le fameux "enrichissez-vous", les rangs des défenseurs de la Nature et de l'humanisme scientifique de demain se renforcent sans cesse. Même aux Etats-Unis, le succès de l'"Earth day", en 1970, a montré qu'un nombre croissant de jeunes Américains ont pris conscience des caractères négatifs d'une civilisation anti-écologique fondée sur une consommation effrénée de biens matériels.

Ces diverses considérations nous conduisent aux frontières de la discipline dont traite cet ouvrage. Il existe en effet une limite au-delà de laquelle la réponse aux dilemmes du monde moderne n'est plus technologique ou scientifique mais du ressort de la morale et de la politique. Nous nous devons à ce propos de mettre en garde le lecteur contre une tendance néfaste qui se fait jour à l'heure actuelle dans tous les pays occidentaux. Elle consiste à rendre la science, et ceux qui la font, responsables de toutes les difficultés que l'on connaît dans le domaine de l'environnement voire de l'économie... Une campagne hostile à la recherche scientifique fondamentale se développe de façon insidieuse tant en Europe qu'aux Etats-Unis. Elle a d'ailleurs conduit en divers pays à une sérieuse récession dans les laboratoires universitaires... La rentabilité des investissements en ce domaine est certes moins apparente pour bien des décideurs que celle qui découle par exemple d'un certain urbanisme dérogatoire... Le savant est donc mis au pilori à un moment où plus que jamais s'impose un effort accru de recherche pour résoudre des problèmes aussi divers que celui de la contraception ou de la mise en valeur rationnelle des ressources de la Biosphère. On ne le répétera jamais assez, ce n'est pas à la technologie mais au mauvais usage que l'on en fait qu'il faut attribuer la crise de l'environnement. Il est inique de rendre la science responsable de choix qui ressortent de la sociologie ou de

BCU IASI CONTRAT UTILISATEUR LIBRA

l'éthique, bien qu'elle puisse donner une réponse concrète aux options faites en ce domaine. La course aux armements, par exemple, est entretenue par des motifs politiques. Ce sont les hommes d'Etat qui en dernière analyse en portent la responsabilité et non le savant. On peut aussi bien utiliser du plutonium pour fabriquer un stimulateur cardiaque que pour réaliser un engin nucléaire tactique. Dans ce dernier cas l'homme de science n'intervient pas dans la décision qui pervertit son savoir.

On en vient donc à s'interroger sur l'aptitude de notre société à surmonter la crise actuelle de l'environnement dans les structures qui sont aujourd'hui les siennes. Un nombre croissant de biologistes est sceptique sur ses possibilités en ce domaine. Contrairement aux affirmations de l'idéologie technocratique contemporaine, on peut affirmer qu'il existe une antinomie fondamentale entre la protection de la Nature et la civilisation industrielle moderne. Certains politiciens tentent de faire croire par ignorance ou par hypocrisie que l'on peut concilier profit et lutte contre les pollutions, préservation des biocœnoses et promotion immobilière. Il est du devoir des biologistes de montrer combien de tels impératifs sont contradictoires.

Voici quelques réflexions auxquelles nous conduit une analyse sans indulgence de l'impact de notre civilisation sur la Biosphère. Nous sommes parfaitement conscients des incidences socio-économiques qu'impliquerait l'avènement de l'Ere humaniste post-industrielle. Nul ne peut en disconvenir, en cette fin du vingtième siècle, seule une modification radicale dans la nature des rapports entre l'homme et la biosphère peut éviter à notre espèce de connaître, à brève échéance, le sort des Dinosaures.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BIBLIOGRAPHIE

I
OUVRAGES FONDAMENTAUX DE BIOLOGIE ET D'ECOLOGIE

Clarke G.L. – *Elements of ecology.* Wiley ed., 3e ,ed., 1959, 534 p., fig., Pl.

Colinveaux P. – *Introduction to Ecology.* Wiley ed., 1973, 621 p.

Dajoz R. – *Précis d'Ecologie.* 2e édition, Dunod ed., 1971, 434 p., 140 fig.

Dasmann R.F. – *Environmental Conservation.* Wiley ed., 3e édition, 1972, 473 p.

Duchaufour P. – *Précis de pédologie.* Masson ed., 1965, 481 p., 78 fig., 23 pl. HT.

Duvigneaud P. – *Ecosystèmes et biosphère* in *l'Ecologie, "Science moderne de Synthèse"* vol. 2, 135 p.
Ed. du Ministère de l'Education Nationale, Documentation n° 23 – 25, Rue archimède Bruxelles, 1967 (2e ed).

Hardy A. – *The open sea : the world of plankton.* Collins ed., 2e ed., 1971, 335 p.

Kendeigh S.G. – *Animal ecology.* Prentice hall ed., Englewood cliffs, 1963, 460 p.

Kormondy E.J. – *Concepts of ecology* Prentice Kall, ed., 1969, 209 p.

Kühnelt W. – *Ecologie générale concernant particulièrement le règne animal.* Masson, 1969, 359 p., 141 fig.

Lamotte M. et Bourlière F. – *Problèmes de productivité biologique.* Publication sous les auspices du PBI. 246 p., 1967, Masson ed.

Lehninger A.L. – *Bioénergétique.* Ediscience, 1969, 238 p.

Lemée G. – *Précis de biogéographie.* Masson ed., 1967, 358 p.

Marcuzzi G. – *Ecologia animale.* Feltrinelli ed. Milan, 832 p., 1968.

Odum E.P. – *Fundamentals of ecology.* Saunders ed., 1959, 546 p.

Odum E.P. – *Ecology,* Holt London Edition, 1971, 152 p.

Smith R.L. – *Ecology and field biology.* Harper and Row ed., 1966, 686 p., fig.

Wallace G.J. – *An introduction to ornithology.* Mac Millan ed., 2e ed., 1968.

Wolcott R.H. – *Animal Biology.* Mac Graw Hill ed., 1946.

II
OUVRAGES D'ECOLOGIE APPLIQUEE ET RELATIFS AUX PROBLEMES DE PROTECTION DE LA NATURE

De Bach P. – *Biological control of insect pests and weeds.* Chapman and Hall, Londres, 1964, 844 p.

Bardé J.P. et Garnier C. – *L'environnement sans frontières. La Suède en question.* Ed. Seghers, 1971, 336 p., fig., pl.

O'Brien R.D. – *Insecticides, action and metabolism.* Academic press, 1967, 332 p.

Cachan P. – *Les portes de l'avenir. L'écologie au service de l'homme.* Horizons de France ed. 218 p., fig.

Mac Cormac B.M. – *Introduction to the scientific study of atmospheric pollution.* Reidel ed., 1971, 169 p.

Commoner B. – *Quelle terre laisserons-nous à nos enfants ?* (traduction française de "Science and Survival").
Ed. du Seuil, 1969, 206 p.

Commoner B. – *The closing circle – confronting the environmental crisis.* Jonathan Cape ed. London, 1972, 336 p.

Dorst J. – *La nature dénaturée.* ed. Delachaux et Niestlé, 1965, 190 p.

Dorst J. – *Avant que nature meure.* Delachaux et Niestlé ed., 1965, 424 p., 74 fig., 110 Pl H.T.

Ehrlich P.R. et Ehrlich A. – *Population, Resources, Environment.* Freeman and Co ed., 1970, 383 p.

Farvar T.M. et Milton J.P. – *The careless technology. Ecology and International Developpment.* Natural History Press ld/Garden City NY, 1972, 1030 p.

Fowler E.B. ed. – *Radioactive fallout, Soils, Plants, Foods, Man.* Elsevier / Amsterdam, London, New York / 1965, 317 p. Ouvrage coll. dirigé par Fowler (25 coll.).

Furon R. – *Le problème de l'eau dans le monde.* Paillot ed., 1963, 251 p., fig., Pl.

Furon R. – *La terre est-elle une mine inépuisable ?* Hachette, 1967, 251 p.

Harant H. et Jarry D. – *Guide du naturaliste dans le Midi de la France.* Delachaux et Niestlé, 1967, 2 Tomes, 711 p., 612 fig., 69 pl.

Heim R., Harroy J.P., Caram M., Petter J.J. et coll. – *Derniers refuges. Atlas des réserves naturelles du monde édité par l'UICN.*
Elsevier press, 1956, 214 p, 51 planches, fig.

DEVASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Helfrich H.W. – *The environmental crisis.* Yale Univ. Press, 1970, 187 p.

Hood D.W. – *Impingment of man on the ocean.* Wiley Interscience, 1971, 738 p.

Hynes H.B.N. – *The biology of polluted waters.* Liverpool University Press, 1960, 202 p., 14 planches.

Kaul R.N. – *Afforestation in arid zones.* Junk ed., 1970, 435 p.

Kozhov M. – *Lake baikal and its life.* Junk ed., La Haye, 1963, 344 p., 111 fig., Pl.

Lieutaghi P. – *L'environnement végétal. Flore, végétation et civilisation.* Delachaux et Niestlé, 1972, 319 p., 50 planches.

Loftas T. – *The last resource.* Hamish Hamilton ed. Londres, 256 p.

Matthews, Smith F.E., Goldberg E.D. et coll. – *Man's impact on terrestrial and oceanic ecosystems.* MIT Press, 1971, Cambridge Mass, 540 p.

Meadows D.L. – *The limits to growth* MIT, 1971.
Traduction française présentée par J. Delaunay, Fayard ed., 1972, 314 p., 43 fig.

Mellanby K. – *Pesticides and pollution.* Collins ed. in "The new naturalist serie" London, 221 p., fig., pl.

MIT 162. – *Man's impact on the global environment.* Report of the study of critical Environmental problems (SCEP). Wilson CL directeur Arrangement director Brown M.K.
MIT, 1970, imprimé par The Colonal press inc. 319 p., fig.

Murdoch W.W. – *Environment, Resources, pollution and Society.* Sinauer, 1971, 440 p.

Nicholson M. – *The environmental revolution.* Hodder and Stoughton, 1970, 366 p.

Odum H.T. – *Environment, power and Society.* Wiley-Interscience, 331 pages, 1971.

Osborn F. – *La planète au pillage.* ed. française, Paillot, 1949, 214 pages.

Owen D.F. – *Animal ecology in tropical Africa.* Oliver and Boyd ed., 1966, 122 p.

Les parcs nationaux. – *C.R. Colloque Fed. Fse. Stés de Sciences Naturelles.* Museum Paris, 15-17 Juin 1970. Imprimeries Réunies Chambery, 1972, 236 p.

Pavan M. – *Que voulons-nous en faire de notre planète ? Appel aux jeunes gens.* Ed. Ministero della agriculture et delle foreste. Rome, 30 pages, 1969.

Polikarpov G.G. – *Radioecology of aquatic organisms.* North-Holland publishing company, 1966, 314 p.

Saint-Marc P. – *Socialisation de la Nature.* Stock ed. Paris, 1971, 360 p.

Singer S.F. – *Global effects of environmental pollutions.* Singer ed., 218 p., 1970. Reidel, Dordrecht, Hollande.

Smith G.H. – *Conservation of natural ressurces.* John Wiley ed., N.Y., 1971, 4e ed., 684 p.

Taylor G.R. – *Le jugement dernier.* (Traduction du Doomsday book). Edition française par Calmann-Levy, 1970, 294 p.

Unesco. – *Utilisation et conservation de la biosphère.* Actes. Conf. Intern. sur les bases scientifiques de l'Utilisation rationnelle et la conservation des ressources de la biosphère, Paris 4.13 septembre 1968.
in Recherches sur les ressources naturelles. Unesco, Paris, 1970, 305 p.

III
AUTRES MISES AU POINT ET PUBLICATIONS ORIGINALES CITEES DANS LE TEXTE

Abeles F.B., Craker L.E. et Forrence L.E. – Fate of air pollutants, removal of ethylence SO_2 and NO_2 by Soil. *Science,* vol. 173, 1971, p. 914-6.

Abelson P.H. – Shortage of Caviar. *Science,* vol. 168, 1970, n° 3928, p. 199.

Adams W.A., Christenson C.W. et Fowler E.B. – Relationship of soil, plant, and radionucleides *in* Fowler *"Radioactive fallout ; soil, plants, man".* Elsevier ed., 1965, p. 30-51.

Altschul A.M. – World protein resources. Adv. chemistry ser. n° 57. *Am. Chem. Soc.* 1966, Washington N.C., 285 p.

D'Ancona V., Battaglia B., et coll. – *Influence of the surrounding lands on the distribution and Productivity in the Adriatic sea.* Intern. Congr. Oceanography, Washington, 1959, Abst. p. 572.

Anderson D.W., Hickey J.J. Rizebrough R.W. et coll. – Significance of chlorinated hydrocarbons residues to breeding pelicans and cormorants. *Canad. Field. Naturalist,* vol. 83, 1969, n° 2, p. 91-112.

Angino E.E., Magnuson L.M., Waugh T.C., Galle O.K., Bredfelt J. – Arsenic in detergents : possible danger and pollution hazards. *Science,* vol. 168, 1971, n° 3979, p. 389-90.

Aubert G., Fournier et Rozanov. – Les sols et le maintien de leur fertilité en tant que facteurs affectant le choix de l'utilisation des terres. in *Utilisation et conservation de la biosphère.* Unesco, Rech. sur les Ressources naturelles X, 1968, p. 53-76.

Aubréville A. – *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale.* Soc. ed. Geo. Mar. Coloniales, Paris, 1949.

Aubréville A. – La destruction de la forêt et des sols en pays tropical. Le cas de Madagascar. *Adansonia,* 11 (1), 6-39.

Aymonin G. et Keraudren-Aymonin M. – L'effritement des richesses végétales malgaches. *Bull. Soc. Bot. Fr.,* 118, 1971, n° 3-4, p. 275-9.

Aymonin G. – Quelques raréfactions ou disparitions d'espèces végétales en France. Causes possibles et conséquences chronologiques. *C.R. Soc. Biogéographie.* Paris, Juin 1972.

Aymonin G. – Les Messicoles vont-elles disparaître ? *Science et Nature,* n° 49, Janv-Fevr. 1962, p. 3-9.

De Bach P., Rosen D., et Kennett C.E. – Biological control of coccids. *in Huffaker, Biological control,* Plenum Press ed. 1971, p. 165-94.

Barham E.G. et Wilton J.W. – Carbon monoxide production by a bathypelagic siphonophone. *Science.* 144, 1964, p. 860-2.

Barrows H.L. – Soil pollution and its influence on plant quality. *Journ. Soil. Water. conserv.* vol. 21, n° 6, 1966, p. 211-6.

Bayley N.D. – Animal wastes and america the beautiful in *"Livestock waste management and pollution abatment".* Proc. Int. Symp. on Livestock Wastes, 19-24/4/1971, Columbus Ohio. *An. Soc. Agric. Eng. Pub.*, p. 6-7.

Beadle G.W. – Ionizing radiation and the citizen. *Sci. Am.,* sept. 1959, n° 3, p. 219-232, vol. 201.

Beeton A.M. – *Statement on pollution and eutrophication of the great Lakes.* The University of wisconsin center for great Lakes Studies special report. Milwaukee Wisconsin, University of Wis., 1970.

Benassy C., Mathys G., Neuffer G., Milaire H., et coll. – L'utilisation pratique de *Prospatella perniciosi* parasite du Pou de San Jose, *Quadraspidiotus perniciosus. Entomophaga,* Mem. hors série, 1968, 4, 28 p.

Berg W., Johnels A., Sjöstrand B. et Westermark T. – *Mercury content in feathers of swedish birds from the past 100 years.* Oikos, 1966, 17, p. 71-83.

Berger M. et Libby W.F. – Exchange of CO_2 between atmosphere and sea water : possible enzymatic control of the rate. in Singer *"global effects of environmental pollution"* Reidel ed., 1970, p. 30-3.

Bergström S.O.W et Gyllander C. – Iodine^{131} in grass and milk correlated with releases from the studsvik research station. *in "Proc. Symp. Environmental Contamination by radioactive materials"* AIEA Vienne, 22-28 Mars 1969, p. 403-16.

Biliotti E. – Le milieu naturel et l'agriculture. *Cah. Ing. Agron.,* n° 247, Juillet 1970, p. 99-103.

"The Biosphere". – *Scientific american,* vol. 223, Septembre 1970, n° 3, 134 pages, fig.

Bloom S.G. et Menzel D.B. – Decay time of DDT. *Science,* 172, n° 3980, p. 213.

Blum H.F. – Environmental radiation and cancer. *Science,* 130, 1959, n° 3388, p. 1545-7.

Blumer J. – Submarine seeps : are they a major source of open ocean oil pollution ? *Science,* 176, 1972, p. 1257-8.

Blumer M. et Sass J. – Oil pollution : persistence and degradation of spilled fuel oil *Science,* 176, 1972, p. 1120-2.

Bogue D.J. – *Principles of Demography.* Wiley and Sons New-York, 1969.

Bolin B. – The carbon cycle. *Sci. am.,* vol. 223, n° 3, p. 124-132.

Van den Bosch R., Leigh T.F., Falcon L.A. et Coll. – The developping programm of integrated control of cotton pests in California *in Huffaker, "Biological control"* Plennum Press, 1971, p. 377-94.

Bossavy. – Pollution de l'air. *Cah. Ing. Agr.* n° 247, 1970, p. 83.

Bourlière F. – *Le monde des Mammifères.* Horizons de France ed., 1954, 217 p.

Bovard. – Pollution nucléaire. *Cah. Ing. Agron.,* n° 247, Juin-Juillet 1970, p. 89-93.

Bowman M.C., Schechter M.S. et Carter R.L. – Behaviour of Chlorinated insecticides in a broad spectrum of soil types. *J. Agric. Food. chem.* 13, 1965, p. 360-5.

Boza-Barducci. – Experiencas sobre el amples del control biologico y de los metodos de control integrado de las plagas del algodonero en el Valle de Canête. *Proc. Sem. Sur. Production Cotonnière,* 18-19 Mai 1965, Whashington D.C.

Branche P. – L'installation d'une raffinerie au cœur du Médoc provoque une nouvelle bataille de la pollution. *Le Monde,* 26 Novembre 1970.

Brar S.S., Nelson D.M., Kline J.R. et Gustafson P.F. – Instrumental analysis for trace elements present in chicago area surface air. *Journ. Geophys. research.,* vol. 75, n° 15, 1970, p. 2939-2945.

Brenner T.E. – Biodegradable detergents and water pollution in Pitts et Metcalf. *"Advances in environmental Sciences and technology"* vol. 1. Wiley and Sons ed., 1969, p. 147-196.

Broecker W.S. – Man's oxygen reserves. *Science,* vol. 168, 1970, p. 1537-8.

Broecker W.S., Li Y.H. et Peny T.H. – Carbon dioxide. Man's unseen artifact in *"impingment of man on the ocean"* Wood.Wiley interscience, 1971, p. 287-324.

Brown L.R. – Human food production as a process in biosphere. *Sci. Am.,* vol. 223, n° 3, p. 160-70.

Brown L.R. et Finsterbusch G. – Man, Food and environment *in* Murdoch *"Environment, resources, pollution and Society".* Sinauer ed., 1971, p. 53-69.

Bruce W.N., Decker G.C. et Wilson J.G. – The relationship of the levels of insecticide contamination of crop seeds to the fat-content of aldrin, heptachlor and their epoxides. *J. Econ. Entomol.* 59, 1966, p. 179-81.

Bryant F.J. Chamberlain A.C. et coll. – Radiostrontium in soil, grass, milk and bone in U.K. ; 1956 results. *J. Nuclear Energy,* 6, 1957, p. 22-40.

Bryson R.A. et Wendland W.M. – Climatic effects of atmospheric pollution *in* Singer *"global effects of environmental pollution"* Reidel ed., 1970, p. 130-138.

Bukovac M.J., Wittwer S.H. et Tukey H.B. – Aboveground plant parts as a pathway for entry of fission products into the food chain with special reference to Sr^{90} and Cs^{137} *in* Fowler *"Radioactive fallout, soils, plant, man"* Elsevier, 1965, p. 82-109.

Burton W.M. et Stewart N.E. – Use of low-lived natural radioactivity as an atmospheric tracer. *Nature,* 186, 1960, p. 584-9.

BIBLIOTECA CENTRAL UNIVERSITARIA

Butler E.J., Nisbet D.I. et Robertson J.M. – Osteoporosis in lambs in a lead mining area *Journ. path. compar and ther.*, 67, 1957, p. 378-96.

Butler P.A. – Commercial fishing investigations. *in* the effects of pesticides on fishs and wildlife. *U.S. Fish. Wildlife circ.*, 226, 1965, p. 65-77.

Cain A., Sokolov V., Smith F. et coll. – La préservation des régions et des écosystèmes naturels : la protection des espèces rares et menacées. *in Utilisation et conservation de la biosphère.* Unesco, Paris, 1970, p.

Campbell J.E., Murthy G.K., Lewis K.H. et Straub C.P. – Radionuclides in milk. *in* Fowler, *"Radioactive fallout, soils, plant, man".* Elsever ed., 1965, p. 156-79.

Carpenter E.J. et Smith K.L. – Plastics on the Sargasso sea surface. *Science,* vol. 175, 1972, p. 1240-1.

Carr J.F. et Hiltunen J.K. – Changes in the bottom fauna of western Lake Erie from 1930 to 1961. *Limnology and oceanography* 10, 1965, p. 551-69.

Carter L.J. – Galveston bay : test case of an estuary in crisis. *Science,* 1970, vol. 167, p. 1102-1108.

Cavanagh L.E., Schadt C.F. et Robinson E. – Atmospheric hydrocarbons and Carbon monoxide measured at point barrow. Alaska. *Environ. Sci. Technol.* 3, 1969, p. 251-7.

Chaboussou F. – *Recherches sur les facteurs de pullulation des Acariens phytophages de la vigne à la suite des traitements pesticides du feuillage.* Thèse Doctorat es-sciences. Faculté des Sciences Orsay, 1969, 238 p., 72 fig. (offsett).

Changnon S.A. – Laporte weather anomaly, Fact or Fiction ? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 49, 1968, p. 4-11.

Chararas C. – *Le Pin Maritime.* Ed. P. Lechevalier, Paris, 1964, 126 p., 20 fig., 11 Pl.

Chassain J. et Ruter G. – L'extermination de la forêt française, l'exemple de la forêt de fontainebleau. *L'entomologiste,* T XXVIII, 1972, n° 1-2, p. 1-9.

Chauvet B. – The forests of Madagascar. in *biogeography and Ecology of Madagascar.* Richard-Vindard et Battestini, Elsevier ed., 1972, p. 191-9.

Cheret I. – *L'eau.* Ed. du Seuil, 127 p., fig.

Chovin P. et Roussel A. – *La pollution atmosphérique.* Coll. "Que sais-je ? ". PUF, 1968, 128 p.

Chow J.J. et Patterson C.C. – Concentration profiles of Baryum and Lead in Atlantic waters of Bermuda. *Earth. Plan. Sci. Letters,* 1, 1966, p. 397-400.

Chura N. et Stewart P.A. – Care, food consumption and behaviour of bald eagles used in DDT tests. *The Wilson Bull. U.S.A.*, vol. 79, n° 4, 1967, p. 441-8.

Clark C. – The earth can feed its people. *World justice,* vol. I, n° 1, 1959-60, p. 35-55.

Clark J.R. – Thermal pollution and aquatic life. *Sci. Am.*, vol. 220, n° 3, 1969, p. 18-44.

Cloud P. – Mineral resources in fact and fancy *in* Murdoch *"Environment, resources, pollution and Society",* Sinauer ed., 1971, p. 71-8.

Cloud P. et coll. – *Resources and Man.* National Academy of sciences. Freeman and Co ed., 1969, p. 259.

Cloud P. et Gibor A. – The oxygen cycle. *Sci. am.*, vol. 223, 1970, p. 110-123.

Colas R. – *La pollution des Eaux.* Coll. "Que sais-je ? " – PUF, 1968, 128 p.

Cole L.M. – The Ecosphere. *Sci. am.*, Avril 1958.

Cole L.M. – Playing Russian Roulette with biogeochemical cycles. *in* Horsfall *"The environmental crisis"* Yale university Press, New Haven, 1970, p. 1-14.

Coleman L.R. et Liberace R. – Nuclear power production and estimated Krypton 85 levels. *Radiological Health data and Reps.*, 7, 1965, p. 615-21.

Comar C.L., Trum B.F., Kuhn U.S.G. et coll. – Thyroid radioactivity after nuclear weapons tests. *Science,* vol. 126, 1957, p. 16-18.

Commoner B. – Threats to the integrity of the nitrogen cycle : nitrogen compounds in soil, water, atmosphere and precipitation. *in* Singer *"Global effect of environmental pollution".* Reidel ed., 1970, p. 70-95.

Concannon T.J. et Genetelli T.J. – Groundwater pollution due to high organic Marine loadings. in "Livestock waste management and pollution abatment" Proc. Int. Symp. or Livestock Wastes, 19-24/4/71, Columbus Ohio. *Ann. Sci. Agric. Eng. Pub.*, p. 249-53.

Cook E. – The flow of energy in an industrial Society. *Sci. Am.*, vol. 224, n° 3, 1971, p. 134-144.

Cook E. – Ionizing radiations. in *"Environment, Resources, Pollution and Society",* par W.W. Murdoch, Sinauer ed., 1971, p. 254-78.

Cope O.B. – Interactions between pesticides and Wildlife. *Ann. Rev. Entom,* 16, 1971, p. 325-64.

De Cormis et Bossavy. – Pollution de l'air. *Cah. Ing. Agronomes. Paris,* n° 247, Juin-Juil. 1970, p. 79-85.

Dajoz R. – *Les Insecticides.* Coll. "Que sais-je ? " PUF, 1969, 2e ed., 128 p., fig.

Dang Tam N. – La guerre chimique. *La Recherche,* n° 5, 1970, vol. 1, p. 442-54.

Daubenmire R. – Ecology of fire in Grasslands. *Adv. in Ecological. Res.*, 1968, vol. 5, p. 209-66.

Davis K. – Population. *Sci. Am.*, vol. 209, sept. 1963, n° 3, p. 62-71.

Dawey S.P. – Effects of chemicals on earthworms : a review of the litterature. *U.S. Fish. Wildlife Sew. Spec. Sci. Rept. Wildlife,* 74, 1963, p. 20.

Decker G.C., Bruce W.N. et Bigger J.H. – The accumulation and dissipation of residues resulting from the use of Aldrin in soils. *Journ. Econ. Entomol.* 58, 1965, p. 266-71.

Deevey E.S. – The human population. *Sci. Am.*, vol. 209, n° 9, 1960, sept.

Deevey E.S. – Mineral cycles. *Sci. Am.*, vol. 223, n° 3, p. 148-58.

Deuser W.G. – Carbon 13 in black sea waters and implica-

tions for the origin of hydrogen sulfide. *Science,* 168, 26 Juin 1970, p. 1575-7.

Didier R. – *Effets du 2,4,5 T et de la Simazine sur le développement de l'embryon d'oiseau.* Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université de Clermont, Juillet 1972, 62 p., XIII planches.

Dimond J.B., Belyea G.Y., Kadunce R.E., Getchell A.S. et Blease J.A. – DDT residues in robins and earthworm associated with contaminated forest soils. *Canad. Entomol.* vol. 102, n° 9, Sept. 1970, p. 1122-30.

Dochinger L.S., Bender F.W., Fox F.L. et Heck W.W. – Chlorotic dwarf on eastern white pine caused by an ozone and SO_2 interaction. *Nature,* 225, 1970, 476-7.

Dobzhansky Th. – L'humanité a-t-elle un avenir ? *La Recherche,* n° 6, novembre 1970, vol. 1, p. 519-25.

Dolphin G.W. et Marley W.G. – Risk evaluation in relation to the protection of the public in the event of accidents at nuclear installations. in *Environmental contamination by radioactive materials.* Symp. A.I.E.A., Vienne 24-28 Mars 1969, p. 241-54.

Mac Donald G.J.F. – Pollution, Weather and climate in Murdoch *"Environment, Resources, Pollution and Society"*. Sinauer ed., Stamford. comm., 1971, p. 326-36.

Doutt R.L. et Smith R.F. – The pesticide syndrome – diagnosis and suggested prophylaxis. Proceedings of an Symposium of AAAS Boston, Massachussett, Décembre 1969. in Huffaker *Biological control.* Plenum. press., 1971, p. 3-15.

Dustman R.F. – *Environmental conservation.* Wiley ed., 3e ed., 1972, 473 p., fig.

Dustman E.H., Stickel L.F. et Elder J.B. Mercury in wild animals Lake St Clair in *"Environmental Mercury Contamination"* Ed., Ann. Arbour Science Publishers, Michigan, 1970, p. 46-52.

Echeverria L. – "Nous avons besoin d'une croissance économique . . ." *Revue FAO (Ceres),* vol. 4, n° 5, 9-10, 1971, p. 25-7.

Edmondson W.T. – *Eutrophication : causes, consequences, correctives* (National Academy of Sciences, Washington DC), 1969.

Edmondson W.T. – Fresh water pollution in Murdoch W.W., *"Environment, resources, pollution and Society"* Sinauer ed., 1971, p. 213-29.

Ehrlich P.R. – Famine 1975 : Fact or fallacy ? in Helfrich : *"The environmental crisis"* Yale University Press., 1970, p. 47-64.

Energy and Power – *Scient. American,* vol. 224, n° 3, Septembre 1971.

Environmental contamination by radioactive materials. – Agence internationale de l'Energie atomique. Vienne, *C.R. Seminaires du 24-28 Mars 1969,* 748 pages.

Environmental quality. – *The First Annual Report of the council on Environmental quality.* US Government Printing Office. Washington DC 20402, 1970, 326 p.

Environmental research. – Report of the royal commission on Natural Resources. Stockholm, Avril 1968, 93 pages.

Fenner F. et Ratcliffe F.N. – *Myxomatosis.* Cambridge UP, 1965, 369 p.

Fenton A.F. – Lichens as indicators of atmospheric pollution. *Irish Naturalists Journ.* 13, 1960, p. 153-8.

Fenton A.F., – Atmospheric pollution of Belfast and its relationship to the lichen flora. *Irish Naturalists Journ.,* 14, 1964, p. 273-95.

Finley R.B. – *Direct and indirect effects of some insecticides on western wildlife.* Abstr. 40 Ann. Conf. W. Assoc. State. Game-fish commissioners U.S.A. 1960 (1961) p. 121-9.

Finley R.B. – Adverse effects on birds of phisphamidon applied to a Montana ferest. *J. Wildlife Manag.,* U.S.A., 1965, 29, n° 3, p. 580-91.

Fishwick R.W. – Sahel and Sudan zone of Northern Nigeria, North cameroons and the Sudan. *in* Karl *"Afforestation in arid zones"* Monographiae biologicae, Junk ed., La Haye, 1970, p. 59-85.

Fitter R. et Leigh-Penberton J. – *Vanishing wild animals of the world.* Kaye and Ward ed. Londres, 1968, 144 p., 43 pl.

Foster R.F., Ophel I.L. et Preston A. – Evaluation of human radiation exposure *in "Radioactivity in the Marine environment"* Rap. de l'Ac. Nle des Sci., Washington, 1971, p. 240-60.

Foster R.F. et Rostenbach R.E. – Distribution of radioisotopes in the Columbia river. *J. ann. Water WKs Assoc.,* 46, 1954, p. 640-663.

Fowler D.L., Mahan J.N., Shepard H.H. – *The pesticide review 1969.* USDA., agricultural stabilisation and conservation service. Washington DC 20250, 1970, 48 pages.

Gahinet M.E., Remy M.L., Moroni J.P. et Pellerin P. – Etude de la radioactivité du régime alimentaire total au niveau des établissements scolaires. *in "Environmental Contamination by radioactive materials".* Symp. AIEA, Vienne, 24-28 Mars 1960, p. 257-72.

Gates D.M. – The flow of Energy in the biosphere. *Sci. Am.,* vol. 224, n° 3, 1971, p. 88-100.

Gaudy A.F. – Biochemical oxygen Demand in Mitchell *"Water pollution microbiology",* Wiley ed., 1972, p. 305-32.

Geiger R. – *The climate near the ground.* Harvard University Press, 1950, (1966, 4e ed.).

Giban et Birkan. – Le petit gibier dans les agroécosystèmes. *Cah. Ing. Agr.* n° 247, 1970, p. 128-33.

Gilbert O.L. – *Lichens as indicators of atmospheric pollution in the Tyne Valley.* Ecology and the industrial society Oxford 1965.

Gilbert O.L. – Some indirect effects of air pollution ou Bark-living invertebrates. *Journ. Appl. Ecol.* vol. 8, n° 1, 1971, p.

FAO CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Gofman J.W. et Tamplin A.R. – The cancer – leukemia risk from Federal Radioprotection council guide line radiation based upon IRCP publications. Hearings of the joint committee or atomic energy. part II. 91e réunion, 20 Février 1970.

Goldberg E. – The chemical invasion of the oceans by man. in *"Global effects of environmental pollution"* par Singer. Reidel ed., Dorchecht, 1970, p. 178-85.

Goldberg E.D., Arnanson G., Gross M.G., Lowman F.G. et Reia J.L. – Proposal for a Base-Line sampling program. *in MIT, Man's impact on terrestrial and oceanic ecosystem,* 1971, p. 377-91.

Goldwater L.J. – Mercury in the environment. *Sci. Am.,* vol. 224, n° 5, 1971, p. 15-21.

Gorman M.L. et Milne M. – Seasonal changes in the adrenal steroid tissue of the common Eider *Somateira mollissima* and its relation to organic metabolism in normal and oil-polluted birds. *Ibis,* G.B., 1971, 113, n° 2, p. 218-28.

Graham M. – The trawl fisheries : a scientific and national problem. *Nature,* 142, 1938, p. 1143-6.

Grassé P.P. – Réflexions sur l'aménagement des parcs nationaux. in *Colloque international sur les Parcs Nationaux.* Paris, Juin 1970. édité par la fed. fse des Stés de Sciences Naturelles, 1971, p. 28-33.

Gray L.H. – Cellular radiobiology. *Rad. Res.,* suppl. 1, 1959, p. 73-101.

Grenon M. – Petroliers géants et super-géants. *Sci. Progrès Découverte,* n° 3422, Juin 1970, p. 28-36.

Grenon M. – Du pétrole à la mer. *Sciences-Progrès-Découverte,* n° 3931, Mars 1971, p. 14-22.

Grenon M. – L'énergie : encore, davantage ... et trop ? *Sci. Progrès. Découv.,* n° 3444, Mai 1972, p. 5-12.

Grison P. – Les possibilités d'application des germes pathogènes dans la lutte contre les chenilles défoliatrices. *Entomophaga,* 7, 1962, p. 269-70.

Grzenda A.R. – Investigations of insecticide pollution in and in the vicivity of Memphis, Tenessee. In *Report on pollution of the lower Mississippi River.* 60-81 (U.S. public health Service, 5 Mai 64).

Grzenda A.R., Nicholson H.P., Patric J.H. – DDT residues in mountains stream water as influenced by treatment practices. *Journ. Econ. Entom.* 57, 1964, p. 615-8.

Gruchow N. – Curbs on 2,4,5 T use imposed. *Science, 168, 1970, p. 453.*

Guennelon. – Pollution nucléaire. *Cah. Ing. Agr.,* n° 247, Juin-Juillet 1970, p. 95-7.

Haagen-Smith A.J. – The control of air pollution. *Scient. Am.* Janv. 1964, 210 (1), p. 24-31.

Halsband E. et Halsband I. – Die ermittlung der Erträglichkeits grenzen von aminotriazol bei fischen und fischnährtienen. *Wass. Laft. betrieb. Dtsch,* 1969, 13, n° 6, p. 209-13.

Hammond A.L. – Phosphate replacements : problems with the washday miracle. *Science,* 23/4/1971, 172, p. 361-3.

Hammond E.C. – Smoking in relation to the death rates on one million of men and women. *Nat. Canc. Inst. of Monograph. U.S.A.,* 19, 1966, p. 127.

Hart L.G., Shultice R.W. et Fouts J.R. – Stimulatory effects of chlordane on Hepatic mirosomal drugs metabolism in the rat. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 5, 1963, p. 371-86.

Hascoet M. – Les résidus d'insecticides organochlorés dans les sols français. *Def. Végétaux,* n° 128, 1968, p. 9-17.

Hasler A.D. – Man Induced eutrophication of Lakes *in* Singer *"Global effects of environmental contamination".* Reidel, ed., 1970, p. 110-25.

Hayes W. et Dale W. – Storage of insecticides in French people. *Nature,* 199, 1963, p. 1189.

Heller N. et Walters D.F. – Impact of changing patterns of energy use on community air quality. *Journ. Air. poll. Control. Ass.,* vol. 15, 1965, n° 9, p. 423-8.

Heurteaux P. – Première étape vers l'établissement d'un bilan hydrologique de la Camargue : étude expérimentale du bilan de l'eau des rizières. *"La Terre et la Vie",* n° 3, 1964, p. 269-293.

Hickey R.J. – Air pollution. *in* W.W. Murdoch : *"Environment, resources, pollution and Society".* Sinauer ed., 1971, p. 189-212.

Hickey J.J. et Anderson D.W. – Chlorinated hydrocarbons and eggshell changes in raptorial and fish-eating birds. *Science U.S.A.,* vol. 162, n° 3850, 1968, p. 271-3.

Hodge P.W. – Large decrease in the clear air transmission of the atmosphère 1,7 km above Los Angeles. *Nature,* 229, 1971, p. 549-51.

Holden B.A. – The possible effects on fish of chemical used in agriculture. *Journ. Proc. Institute of sewage purification,* n° 4, 1964, p. 3-10.

Holt J.S. – The food resources of the ocean. *Sci. Am.,* 221, 1969, p. 190-8.

Horn M.H., Teal J.M. et Backus R.H. – Petroleum lumps on the surface of the sea. *Science,* 168, 1970, n° 3928, p. 245-6.

Horsfall J.G. – Criteria for the use of pesticides : a socio-economic evaluation. in Chichester *"Research in Pesticides",* p. 3-16. Academic Press. ed., 1965.

Horstadius S. – De l'effet désastreux de l'enrobage des semences sur l'avifaune suédoise. *Oiseau Fr.* (1965 pour 1966) T35, p. 71-5.

Hubbert M.K. – Energy Resources *in "Resources and man"* par Cloud et coll. Ac. Nle des Sciences N.Y. Freeman ed. San Francisco, 1969, p. 157-242.

Hubbert M.K. – Energy resources, in Murdoch *"Environment, resources, pollution and Society".* Sinauer, 1971, p. 89-116.

Hubbert M.K. – The energy resources of the earth. *Sci. Am.,* 224, Sept 1971, n° 3, p. 61-70.

Hunt E.G. et Bischoff. – Inimical effects on wildlife of periodic application of DDD to Clear Lake. *Calif. Fish Game,* 46 (1), 1960, p. 91-106.

Hunt L.B. – Kinetics of pesticide poisoning in Dutch elm disease control. in *"The effects of pesticides ou fish and wildlife"*. U.S. Fish Wildlife Serv. Circ., 226, 1965, p. 12-3.

Hurpin B. et Feron P. – Essais parcellaires de lutte contre les larves de *Melolontha melolontha* par la mycose à *Beauveria tenella. Rev. Path. Veg. Ent. Agric. France.*, 43, 1964, p. 227-36.

Hutchinson G.E. – The biosphere. *Sci. Am*, vol. 223, n° 3, 1970, p. 45-53.

Hutchinson J. – *Population and food supply: assays on human needs and agricultural prospects.* Cambridge University Press, 1969, 144 p.

Hylckama (Van) T.E.A. – Water resources *in* Murdoch W.W., *"Environment, Resources, Pollution and Society"*, Sinauer ed., 1971, p. 135-55.

Ide F.P. – Effects of forest spraying with DDT on aquatic insects of salmon streams in New Brunswick. *J. Fish. Res. Board. Canad.*, 1967, T24, n° 9, p. 769-805.

Idman M. – *Environmental research.* Report of the royal commission on Natural Resources. Stockholm, Avril 1968, 93 p., 21 fig.

Inman R.E., Ingersoll R., Levy E.A. – Soil : a natural sink for Carbon monoxide *Science*, 18/6/71, 173, p. 1229-31.

Inger R.F., Hasler A.D., Bormann F.H. et Blair W.F. – *Man in the living environment.* University of Wisconsin Press, 1972, 268 p.

Iperti G. et Laudeho Y. – L'utilisation des coccinelles exotiques dans la protection des plantes attaquées par les cochenilles *diaspididae. C.R. 7e Cong. Int. Prot. Vgx. Paris*, 1970, p. 495.

Iverson J. – Forest clearance in the stone age. *Sci. Am.* Mars 1956.

Jacob A. – Chantiers en Sibérie – III, protéger le Baïkal. *Le Monde*, 29 Décembre 1972, page 5.

Jacobson M. – *Insect sex attractants.* John Wiley and sons ed., 1967, 154 p.

Jaffe L.S. – The global balance of carbon monoxide. in Singer *"Global effects of environmental pollution"*. Reidel ed. Dordrecht, 1970, p. 34-49.

Jeannel R. – *Hautes montagnes d'Afrique.* Publications du Museum National d'Histoire Naturelle, supplément n° 1, 1950, 253 p., fig.

Jeensu O.I. – Fossil fuels as a source of Mercury pollution. *Science*, 4 Juin 1971, p. 1027-8.

Jensen S., Johnels A.G., Olsson M. et Otterlind G. – DDT and PCB in marine animals from Swedish waters. *Nature G.B., n° 5216, 224, 1969, p. 247-50.*

Johnson F.S. – The oxygen and carbon dioxide balance in the earth's atmosphere. *in* Singer *"global effects of environmental pollution.* p. 5-11. Reidel ed., 1970.

Joly P. – Les hormones des insectes. *La Recherche*, n° 21, 1972, vol. 3, p. 213-20.

Jones E.P. – DDT stopped, suit dropped. *Science*, 173, 1971, p. 38.

Jourdheuil P. – Le rôle des entomophages dans la productivité d'une agrobiocoenose. *in* Lamotte et Bourlière, *"Problèmes de productivité biologique"*. Masson ed., 1967, p. 221-43.

Keilling J. – Pollution des sols. *Cah. Ing. Agr.*, n° 247, Juin-Juillet 70, p. 87-8.

Kilgore W.W. – Chemosterilants. *in* Kilgore et Doutt, *"Pest control"* Academic Press ed., 1967, p. 197-239.

Knippling E.F. – Possibilities of insect control or eradication through the use of sexually sterile males. *Journ. Econ. Entom.*, 48, 1955, p. 459-62.

Knippling E.F. – The sterility method of pest population control. *in* Chichester *"Research in Pesticides*, p. 233-49, Academic Press ed., 1965.

Koeman J.H., Oskamp A.A.G., Veen J. et coll. – Insecticides as a factor in the mortality of the sandwich tern *(Sterna sandwicensis)* A preliminary communication. *Med. Rijks Faculteit. Landbouw. Went. Gent.*, 1967, XXXII, n° 3-4, p. 841-54.

Koeman J.H. Ten Noever de Brauw M.C. et de Vos R.H. – Chlorinated biphenyls in fish, mussels and birds from the Rhine and the Netherlands coastal area. *Nature*, 221, p. 1126.

Kotin P., Falk H.L. et Thomas M. – Aromatic hydrocarbons. III. Presence in the particulate phase of Diesel-engine exhausts and the carcinogencity of exhausts extracts. *Arch. Indus. Health*, 11, 1955, p. 113-120.

Kovda V., Smith F., Eckardt F.E., Haceley M., Berward E. et coll. – Conceptions scientifiques contemporaines de la biosphère. in *"Utilisation et conservation de la biosphère"* Unesco ed., 1970, p. 13-21.

Kowalski K. – Qui a tué les grands mammifères ? *Sci-Progrès-Découverte*, Dunod ed., Avril 1971, p. 31-7.

Kurth G. – Die bevolkerungsgeschischte des Menschen. *Helb. Biologie*, IX, 1965, n° 2, p. 461.

Labeyrie V. – Utilisation des modèles écologiques pour l'aménagement de l'espace. *Abst. Conf. Protecna*, Rouen, 18 Octobre 1971, 7 p.

Lamotte M. et coll. – Recherches écologiques dans la savane de Lamto (Côte d'Ivoire) : présentation du milieu et du programme de travail. *La Terre et la Vie*, 21, 1967, p. 197-329.

Lamotte M. – Représentation synthétique des aspects statiques et dynamiques de la structure trophique d'un Ecosystème. *C.R. Ac. Sci. Paris*, 1969, Série D, t. 268, p. 1952-5.

Lamotte M. – La participation au P.B.I. de la station d'Ecologie tropicale de Lamto (Côte d'Ivoire). *Bull. Sté. Ecologie*, Tome 1, fasc. 2, 1970, p. 58-65.

Langer W. – The black death. *Sci. Amer.*, n° 2, 1964, vol. 210, p. 114-21.

Langham W.H. – Biospheric contamination by radioactive fallout *in* Fowler *"Radioactive fallout, Soils, Plants, Foods, Man"*. Elsevier ed., 1965, p. 1-18.

Laurent P.J. – Lac Leman : Effects of exploitation, eutrophication and introductions on the Salmonid community. *J. Fish. Res. Board. Canada.*, 29, 1972, p. 867-75.

Lebreton P. – Centrales nucléaires et environnement. Mise au point.
I – *Bull. Soc. Lin. Lyon*, 41, 1972, n° 9, p. CV-CVIII.
II – *idem*, 42, 1973, n° 2, p. XXII-XXXV.

Lees L. – Waste heat on the Los Angeles bassin, in *"Man's impact on the global environment"*, MIT Press, 1970, p. 65.

Legault-Demare J. – Les "doses tolérables d'irradiation" : le débat continue. *La Recherche*, vol. 4, 1973, n° 31, p. 169-71.

Lezer G. – Rendre sûres les centrales nucléaires. *Sci. Progrès-Découverte*, Sept. 1972, n° 3997, p. 13-9.

Lichtenstein et coll. – Insecticidal residues in concumbers and alfafa grown on aldrin and heptochlor treated soils. *J. econ. entom. U.S.A.*, 1965, T58, n° 4, p. 742-6.

Lichtenstein E.P., Schultz K.P. et coll. – Biological interaction between plasticizers and insecticides. *J. Econ. entom.* 62, 1969, p. 761-5.

Lillie R.J. – Air pollutants affecting the performance of domestic animal. *Agricultural Handbook* n° 380., 109 p., USDA, Washington DC 20402, 1970.

Linzon S.N. – Consequence of air pollutants on vegetation in Mac Cormac *"An introduction to the scientific study of air pollution"*. Reidel ed., 1971, p. 131-51.

Liu O.C., Seraichekas H.R. et Murphy B.L. – Fate of poliovirus in northern qualiangs. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med. USA*, 121, 1966, p. 601-7.

Livestock waste management and pollution abatment. *Proc. Int. Symp on livestock wastes, Ann. Soc. Agric. Eng. Pub.*, 19-22 Avril 1971, Columbus Ohio, 360 pages.

Loutit. – Strontium in man *in* Symp. AIEA, *"Environmental contamination by radioactive materials"*, Vienne 1969, p. 27-33.

Lovering T.S. – Mineral Resources from the land, in *Resources and Man*, Ac. Nle des Sciences U.S., Freeman ed., 1969, p. 109-34.

Lowdermilk W.C. – The reclamation of a man-made desert. *Sci. Am.*, mars 1960.

Lowman F.G., Rice T.R. et Richards F.A. – Accumulation and redistribution of radio-nucleides by marine organisms. in *"Radioactivity in the Marine environment"* ed. Ac. Nle des Sci. New-York, 1971, p. 161-99.

Lowry W.P. – The climate of cities. *Sci. Am.*, Août 1967, vol. 217, n° 2, p. 15-23.

Lundholm B. – Interaction between oceans and terrestrial ecosystems. *in* Singer *"global effects of environmental contamination"* Reidel ed., 1970, p. 195-201.

Lutz-ostertag Y. et Lutz H. – Action néfaste de l'herbicide 2,4 D sur le développement embryonnaire et la fécondité du gibier à plume. *C.R. Ac. Sci.*, 271, 1970, p. 2418-21.

Mac Dermott W. – Air pollution and public health. *Sci. Am.*, octobre 1961.

Mac Donald G.J.F. – Pollution, weather and climate in *"Environment, resources, pollution and Society"* par Mac Murdoch. Sinauer ed., Stamford Comm., 1971, p. 326-36.

Mac Intyre F. et Holmes R.W. – Ocean pollution in *Environment, Resources, pollution and Society.* Murdoch W.W ed., Sinauer, 1971, 230-53.

Mac Neil M. – Lateritic soils. *Scient. Amer.*, Novembre 1964.

Mac Neil M. – Lateritic soils in distinct tropical environments : Southern sudan and Brazil *in* Farvar et Milton *"The careless technology"*. Natural History Press ed., 1972, p. 591-707.

Manabe S. – *The dependence of atmospheric temperature on the concentration of carbon dioxide.* Singer ed., 1970, p. 24-9. D. Reidel publishing company. Dorchecht, Holland.

Manabe S. – Cloudiness and the radiative – convective equilibrium. in *"Global effects of environmental pollution"* par Singer. Reidel ed., 1970, p. 156-7.

Manabe S. et Wetherald R.T. – Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective ajustement. *J. atmosph. Sci.*, 24, 1967, p. 241-59.

Marshall J.S. – The effects of continuous gamma radiation on the intrinsic rate of natural increase of *Daphnia pulex. Ecology*, 43, 1962, p. 598-607.

Martin P.S. – Pleistocene overkill. *Natural History*, vol. 76, n° 10, Dec. 67, p. 32-8.

Masters R.L. – Air pollution – human health effects. *in* Mac Cormac – *"Introduction to the scientific study of atmospheric pollution"*. Reidel, 1971, p. 97-130.

Maurin C. – *Effets de la diminution du volume des eaux du Nil sur la productivité secondaire en méditerranée orientale.* FAO, Rome, 1970, rapport préliminaire au XXII[e] congrès de la commission internationale pour l'exploration scientifique de la méditerranée.

Meigs P. – *World distribution of arid and semi-arid homoclimates.* in Arid Zone programme. I – Review of research on arid zone hydrology UNESCO – Paris 1953.

Menhinick E.F. – Comparison of invertebrate populations of soil and litter of mowed grasslands in areas treated and untreated with pesticides. *Ecology*, 43, 1962, p. 556-61.

Mestres R., Heurteaux P. et coll. – Incidence des thérapeutiques agricoles sur la pollution du milieu aquatique. *Ann. Hyg. L. Fr-Med. et Nut.* T8, 1972, n° 3, p. 71-90.

Metcalf R.L. – Methods of estimating effects *in* Chichester *"Research in pesticides"*, Academic Press., 1965, p. 17-29.

Middleton J.T. – Trends in air pollution damage. *Arch. environ. Health.*, 8, 1964, p. 19-23.

Miettinen J.K. – *Assessment of radioactivity in man.* Proc. Symp. Heidelberg, 2, Int. Agency of Atomic Energy, Vienne, 1964, p. 193.

Miettinen J.K. – *Radioecological concentration processes.* Pergamon Press., N.Y., 1967, p. 267.

Miettinen J.K. – *The present situation and recent developments in the accumulation of Cs^{137}, Sr^{90} and Fe^{55} in arctic foodchains.* Proc. sem. Vienne, 24-28 Mars 1969, Agence intern. de l'Energie atomique, Vienne, 1969, p. 145-51.

Minder L. – Der Zürichsee als Eutrophierungsphänomenen. Summarische Ergebnisse aus fünfsig Jahren Zurichseeforschung. *Geologie Meere Binnengewasser,* 2(2), 1938, p. 284-99.

Mitchell J.M. – On the world-wide pattern of secular temperature changes. in *Changes of climate, Arid zone* monograph, Unesco, Paris, 1963, 20, p. 161-81.

Mitchell J.M. – A preliminary evaluation of atmospheric pollution as a cause of the global temperature fluctuation of the past century. *in* Singer *"Global effects of environmental pollution"* Reidel ed., Dordrecht, 1970, p. 139-55.

Miyake Y. – Patterns of radioactive contamination and future alteration of the ocean. *in* Hood *"Impingment of man on the ocean"*. Wiley interscience ed., 1971, p. 569-88.

Möller F. – On the influence of changes in the CO_2 concentration in air on the radiation balance of the earth's surface and on the climate. *J. Geophys. Res.* 68, 1963, p. 3877-86.

Monod Th. – Le rôle des réserves comme agents de la conservation d'espèces et d'associations animales. in *Derniers refuges,* UICN, Elsevier ed., 1956, p. 34-7.

Moore C.E. – Some physical and biological aspects of air pollutants. *IEE Transactions on nuclear science* vol. NS-18, n° 1, Fev. 1971, p. 13-18.

Moore N.W. – A synopsis of the pesticide problem in *"Advances in ecological research"* Acad. Press ed., vol. 4, 1967, p. 75-129.

Moore N.W. et Tatton J.O'G – Organochlorine insecticide residues in the eggs of sea birds. *Nature,* 207, 1965, p. 42-3.

Moore N.W. et Walker C.H. – Organic chlorine insecticide residues in Wild birds. *Nature,* Mars 1964, n° 201, p. 1072-3.

Morris B.F. – Petroleum : Tar quantities floating in the N.W. Atlantic taken with a new quantitative neuston net. *Sci.,* 1973, 1971, p. 430-1.

Murdoch W.W. – Environment at the equilibrium population. in *"Environment, resources, pollution and "society"* Sinauer ed., 1971, p. 416-35.

Murozumi M., Chow T.J. et Patterson C. – Chemical concentrations of pollutants lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and antarctic snow strata *Geochim. Cosmochim. Acta,* 33, 1969, p. 1247-94.

Nahal I. – Le Pin d'Alep. Etude taxonomique, phytogéographique, ethologique et sylvicole. *Ann. Ecole. Nat. Eaux et Forêts,* Nancy, 1962, 19, n° 4, p. 479-687.

Nash R.G. et Woolson C.A. – Persistance of chlorinated hydrocarbons insecticides in soils. *Science,* 157, 1967, p. 224-7.

Nelson-Smith A. – Biological consequences of oil pollution and shore cleansing. *Field Studies,* G.B., 2 (suppl.), 1968, p. 73-80.

Nelson-Smith A. – The problem of oil pollution of the sea *Adv. mar. biol.,* vol. 8, 1970, p. 215-306.

Newell N.D. – The evolution of reef. *Sci. Am.* 226, Juin 1972, n° 6, p. 59-69.

Newell R.N. – The global circulation of atmospheric pollutants. *Sci. Am.* vol. 224, 1971, n° 1, p. 32-42.

Newsom L.D. – Consequences of insecticides use on non target organisms. *Ann. Rev. Ent.* vol. 12, 1967, p. 257-286.

Nicholson H. et Thoman J.R. – Pesticide persistence in public water, their detection and removal. *in* Chichester *"Research in Pesticides",* 1967, p. 181-190. Acad. Press London NY.

Niedergang M. – Les indiens du périmètre Nord du Brésil, *Le Monde,* 9 Février 1973, p. 5.

Organisation des Nations Unies. – Population studies n° 41. *World population prospects as assessed in 1963,* 1966, 149 p.

Orians G.H. et Pfeiffer E.W. – Ecological effects of the war in vietnam. Effects of defoliation, bombing and other activities on the ecology of Vietnam are described. *Science,* 168, 1970, p. 545.

Parker F.L. – Radioactive wastes from fusion reactors. *Science,* 159, 1968, n° 3810, p. 83-4.

Patterson C. – Lead in *"Impingment of man on the ocean"* Wiley interscience ed., 1971, p. 245-58.

Pattle R.E., Stretch M. et coll. – The toxicity of fumes from a Diesel engine under four different burning conditions. *Brit. Journ. Industr. Med.,* 14, 1957, p. 47-55.

Paulik G.J. – Anchovies birds and fisheman in the Perou current. *in* Murdoch *"Environment, resources, pollution and Society"*, Sinauer ed., 1971, p. 156-85.

Peakall D.B. – Effect of DDT on calcium uptake and Vitamine D metabolism in birds. *Nature,* London, vol. 224, 1969, n° 5225, p. 1219-20.

Peakall D.B. – Pesticides and the reproduction of birds. *Sci. Am.,* Avril 1970, p. 73-8.

Pelletier J. – Première colonisation du Léman par *Oscillatoria rubescens* D.C. – *Rev. Algol.* 9, 1968, p. 186-92.

Penman H.L. – The water cycle. *Sci. Am.,* vol. 223, n° 3, 1970, p. 99-108.

Peterle T.J. – DDT in antarctic snow. *Nature G.B.,* 1969, 224, n° 5219, p. 620.

Peterson J.T. et Bryson R.A. – Atmospheric aerosols :

PARIS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

increased concentrations during the last decade. *Science,* 162, 1968, 3849, p. 120-1.

Petit G. – Le Rôle des Parcs et Réserves dans la Science : Ecologie et expériences. in *"Derniers refuges"* UICN, Elsevier ed., 1956, p. 21-27.

Petrides G.A. – The management of wild hofed animals in the United States in relation to land use. *Terre et Vie,* 1961, p. 181-202.

Pichon M. – Pollution du milieu marin. *Cah. Ing. Agr.* n° 247, 1970, p. 73-7.

Pitts J.N. – Photochemical air pollution : singlet molecular oxygen as an environmental oxidant. in *"Advances in environmental technology"* Tome I, 1969, Wiley interscience ed., p. 289-337.

Piveteau J. – Les découvertes d'oldoway (Tanganyika) et les problèmes des origines humaines. *Sci. Progrès – La Nature,* n° 3356, Dec. 64, p. 457-462.

Pfeffer P. – Une espèce en sursis : le Kouprey *Le Courrier de la Nature,* Paris, n° 18, 1971, p. 57-60.

Plass G.N. – Carbon dioxide and climate. *Sci. Am.,* n° 1, vol. 201, Juillet 1959.

Porter R.D. et Wiemeyer S.N. – Dieldrin and DDT : effects on sparrow hawk eggshells and reproduction. *Science,* vol. 165 1 11/7/69, p. 199-200.

Powers C.F. et Robertson A. – The aging of great lakes. *Sci. Am.,* Nov. 1966, vol. 215, n° 5, p. 94-104.

Pratt C.J. – Chemicals fertilizers. *Sci. Am.,* vol. 212, n° 6, Juin 1965, p. 62-72.

Preston A. et Jefferies D.F. – Aquatic aspects in chronic and acute contaminations situations. *in "Environmental contamination by radioactive products".* Proc. Symp. A.I.E.A., Vienne 24-28 Mars 1969, p. 183-211.

Pritchard D.W., Reid R.O., Okubo A. et Carter H.H. – *in Radiactivity in the marine environment. Physical process of water movement and mixing.* Ac. Nat. Sci. ed., NY, 1971, p. 90-126.

Pugh G.J. et Williams J.I. – Effects of organoHg fungicides on saprophytic fungi and on litter de composition. *Trans. brit. mycol. Soc.,* 1971, 57, n° 1, p. 164-6.

Radioactivity in the marine environment. Rapport de l'Académie Nationale des Sciences, Washington, 1971, 280 p.

Rao D.N. et Le Blanc F. – Effects of sulphurdioxyde on the lichen algae with special reference to chlorophyll. *Bryologist* 69.

Ramade F. – Contribution à l'étude du Mode d'Action de certains insecticides de synthèse, plus particulièrement du Lindane, et des phénomènes de résistance à ces composés chez *Musca domestica* L. *Ann. Inst. Nat. Agron.* Paris, T.V NS, 1967 (1968), p. 1-268, 41 fig., 13 pl.

Ramade F. – La pollution des eaux par les insecticides organochlores et ses effets sur la faune aquatique. *Sci. Progrès. La Nature,* Dunod ed., n° 3404, Déc. 1968, p. 441-8.

Ramade F. – Evolution et avenir de la lutte chimique contre les insectes nuisibles. *Bull. Inf. Cie Fse des Pétroles,* n° 38, été 1969, p. 26-32.

Ramade F. – Influence des traitements pesticides sur l'avifaune. *Sci. Progrès. Découverte,* Dunod ed., n° 3427, Nov. 1970, p. 24-35.

Ramade F. – La pollution de la Biosphère par le Mercure et ses conséquences écologiques. *Sci. Progrès. Découverte,* Dunod ed., 1972, Sept., n° 3447, p. 39-47.

Ramade F. – Evolution et avenir de la lutte biologique. *Bull. Soc. Zool. Fr.,* T.97, n° 4, 1972 (1973) p. 629-651.

Ramade F. et Louis C. – Un ensemble vivant d'un intérêt exceptionnel est menacé en Camargue. *"La Nature",* Dunod ed., n° 3374, juin 1966, p. 216-22.

Rappaport R.A. – The flow of energy in an agricultural Society. *Sci. Am.,* vol. 224, n° 3, 1971, p. 116-32.

Rasool S.I. et Schneider S.H. – Atmospheric CO_2 and aerosols : effects of large increases in global climate *Science,* vol. 173, p. 138-41.

Ratcliffe D.A. – Decrease in eggshell weight in certain birds of prey. *Nature,* 215, 1967, p. 208.

Ratcliffe D.A. – Changes attributable to pesticides in egg breakage frequency and eggshell thickness in some british birds. *J. appl. ecol.* 7, 1970, p. 67-115.

Revelle R. – Water. *Sci. Am.,* Sept. 1963, n° 3, p. 93-108, vol. 209.

Ricker W.E. – Food from the sea. in *"Resources and Man",* (Ac. Nle des Sciences U.S., commité sur les ressources), Freeman ed., 1969, p. 87-108.

Ripperton L.A., Worth J.J.B., Kornreich L. – *Nitrogen dioxide and Nitric oxide in non-urbain air.* 61e réunion annuelle de l'association américaine pour le contrôle de la pollution de l'air, Juin 1968, Communication n° 68-122.

Risebrough R.W. – Chlorinated hydrocarbons in *"Impingment of man on the ocean"* Hood ed. Wiley interscience, 1971, p. 259-86.

Risebrough R.W., Menzel D.B., Martin D.J. et Olcott H.S. – DDT residues in Pacific sea birds : a persistent insecticide in marine food chains. *Nature,* 216 (5115), 1967, p. 589-91.

Rizebrough R.W., Huggett R.J., Griffin J.J. et Goldberg E.D. – Pesticides : transatlantic movements in the northeast trades. *Science,* 159, 1968, 3820, p. 1233-36.

Risebrough R.W., Rieche P., Peakall D.P., Herman S.G., et Kirven H.M. – Polychlorinated biphenyls in the global ecosystem. *Nature,* 1968, 220, p. 1098-1102.

Robbins R.C., Bory K.M. et Robinson E. – Carbon monoxide in the atmosphere. *J. Air. poll. control. assoc.,* 15, 1968, p. 423-8.

Robinson E. et Robbins R.C. – *Sources, Abundance and Fate of gaseous atmospheric pollutants.* Final report (1968) et suplement (1969) SRI Project 6755 for american petroleum, Institute.

Robinson E. et Robbins R.C. – Gazeous atmospheric pollutants from urbain and natural sources. *in* Singer. *"Global effects of environmental pollution"*. Reidel ed., 1970, p. 50-64.

Rodin L.E. et Bazilevich N.I. – *Production and mineral cycling in terrestrial vegetation.* Oliver and Boyd, Edinbourgh, 1967, 288 p.

Rondest J. – Le procès des Nitrates. *La Recherche,* n° 29, Dec. 72, vol. 3, p. 109405.

Roos B. – Fran "Göteborgs hälsovardsnamud, hepatit epidemi, spridd genom ostron. *Svenska Läkartidn,* 53, 1956, p. 989-1003.

Rouvier J. – *Pollution de l'air et de l'eau.* Rapport remis au Ministre de la santé publique et de la sécurité sociale le 11 Février 1970. 20 pages.

Rudd R.L. – *Pesticides and the living landscape.* The University of Wisconsin Press, 1964, 320 p.

Rudd R.L. – Pesticides *in* Murdoch *"Environment, Resources, Pollution and Society"*. Sinauer ed., 1971, p. 279-301.

Rudd R.L. et Guenelly R.E. – Effects of DDT, Toxaphene and Dieldrin ou pheasant reproduction. *Auk, 73, 1956, p. 529-39.*

Rühling Å. et Tyler G. – An ecological approach to the lead problem. *Botaniska Notiser,* 3, vol. 121, 1968, p. 321-42.

Ryther J.H. – Photosynthesis and food production of the sea. *Science,* 166, 1969, n° 3901, p. 72-76.

Saha J.G., Lee Y.W., Tinline R.D. et coll. – Mercury residues in cereal grains from seeds or soils treated with organomercury compounds. *Canad. Journ. Plant. Sci.* 1970, 50, n° 5, p. 597-9.

Schaeffer V.J. – The inadvertant modification of the atmosphere by air pollution. *in* S.F. Singer, *"Global Effects of Environmental pollution"*, Reidel ed. 1970, p. 158-174.

Schaller G.B. – *The mountain gorilla.* University of chicago Press., 1963, Chicago.

Schmid F.C. – The status of the osprey in Cape May County, New Jersey, between 1939 and 1963. *Chesapeake Science,* USA, vol. 7, Dec. 1966, n° 4, p. 220-3.

Schuck E.A. et Stephens E.R. – Oxides of Nitrogen. in Pitts et Metcalf *"Advances in environmental Sciences and technology"* Wiley ed., vol. 1, 1969, p. 73-118.

Schuphan (Von) W. – Der Nitrat gehalt von spinat (*Spinacia oleracea* L.) in beziehung zur methänoglobinämie der Säuglinge. *Z. Ernährungswiss,* 5, 1965, p. 207.

Scott-Russell R. et Bruce R.S. – Environmental contamination with fall-out from nuclear weapons. in *Environmental contamination by radioactive materials.* Proc. Symp. AIEA, Vienne, 24-28 Mars 1969, p. 3-26.

Shaw B.W. et Munn R.E. – Air pollution meteorology. *in* Mac Cormac. *Introduction to the scientific study of atmospheric pollution.* Reidel ed., 1971, p. 53-96.

Simonov A. – Nettoyer les mers (en russe). *Sovietskaïa jizn,* Janvier 1970, p. 59.

Singer S.F. – Human energy production as a process in the biosphere. *Sci. Am.* vol. 223, n° 3, p. 160-70.

Sinha B.P. et Pande S. – Hazards in diesel smoke. *Indian Med. Assoc. Journ.* 49 (7), 1967, p. 330-2.

Skye E. – Lichens and air pollution. *Acta phytogeographica suecica,* 52, 1968, p. 1-23, XIII pl., Uppsala.

Smith F. et coll. – Cycles of elements. *in* Hasler, Inger, Borman et Blair. *"Man in the living environment"*. Institute of Ecology, University of Wisconsin Press., 1971, p. 41-80.

Smith J.E. – *"Torrey Canyon" Pollution and marine life.* Cambridge University Press, Londres, 1968, 210 pages, 39 fig.

Smith R.F. et Van den Bosch R. – Integrated control *in* Kilgore et Doutt, *"Pest Control"* Academic Press. 1967, p. 295-340.

Spann J.W., Heath R.G., Kreitzer J.F. et Locke L.N. – Ethylmercuryparatoluènesulfonanilide : lethal and reproductive effects on pheasants. *Science,* vol. 175, 21 Janvier 1972, p. 328-31.

Sparrow A.M. et Christensen E. – Tolerance of certain higher plants to chronic exposure to gamma radiation from Cobalt 60. *Science,* 1953, 118, p. 697-8.

Squires A.M. – Clean power from dirty fuels. *Sci. Am.,* vol. 227, n° 4, oct. 72, p. 26-35.

Stewart C.A. – Atmospheric circulation of DDT. *Science* vol. 177, 25 Août 72, p. 724-5.

Stephens E.R. – Peroxyacyl Nitrates in *"Advances in environmental science and technology"*, par Pitts et Metcalf., p. 119-144, vol. I, Wiley interscience ed., 1969.

Stickel L.F. – Biological data on PCBs in animals other than Man. in *"PCB and the environment"* Interdepartemntal Task Force ou PCBs, Washington, Mai 1972, p. 158-172.

Stickel W.H., Hayne W., Stickel L.F. Effects of heptachlor contamined earthworms on woodcock. *Journ. Wildlife management,* T29, p. 132-46.

Stickel L.F., Chura N.J., Stewart P.A. et coll. – *Bald eagle pesticide relation.* Trans. 31th North am. Wildlife and Nat. Res. Conf., 14-16 Mars 1966, p. 190-200. Publ. Wildlife Manag. Instit.

Storer J. – Comments on manuscrit "low doses radiations, chromosomes and cancer" by J.W. Gofman and A.R. Tamplin. in *Environmental effects of producing electric power. pleanings of the joint committee on* Atomic energy Part I, p. 1653-9, 91e réunion 28/10-7/11/1969.

Stumm W. et Morgan J. – *Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in Natural waters.* Wiley Interscience, 1970, 583 p., fig.

Stumm W. et Stumm-Zollinger E. – The role of Phosphorus in eutrophication. in R. Mitchell *"Water pollution microbiology"* Wiley interscience ed., 1972, p. 1-42.

Summers C.M. – The conversion of energy. *in Sci. Am.* "Energy and Power", vol. 224, sept. 1971, n° 3. p. 148-60.

Taber R.D. et Dasmann R.F. – The dynamics of three natural populations of the deer *Odocoileus hemionus columbianus. Ecology,* 38, 1957, p. 233-46.

Tatton J.O'G et Ruzicka J.H.A. – Organochlorine pesticides in antarctica. *Nature,* 215, 1967, p. 346-8.

Ternisien J.A. – *Les pollutions et leurs effets.* PUF, 1968, 187 p. Paris coll. "La Science vivante".

Ternisien J.A. – *La lutte contre les pollutions.* PUF, coll. "La Science vivante", 183 p.

Theolleyre J.M. – La compagnie française de raffinage répond aux défenseurs du Beaujolais. *Le Monde,* 26 Février 1971.

Train R.E., Cahn R., Mac Donald J.F. et coll. – *Environmental quality.* The first animal report of the U.S.W.H. council or the environmental quality. U.S. gov. print. off. Washington DC 20402, 1970, 326 p.

Tribe D., Curry-Lindahl K., Pagot J., Sokolov V. et Smith F. – L'écologie animale, l'élevage et l'aménagement efficace de la faune sauvage et de son habitat. in *Utilisation et conservation de la biosphère.* Unesco, 1970, p. 137-157.

Turtle E.E., Taylor A. et Wright E.N. – The effects on birds of chlorinated hydrocarbons used as seed dressings. *J. Sci. Food and Agric.* 14, n° 8, 1963, p. 567.

Udall D.H. et Keller K.P. – A report on fluorosis in cattle in the Columbia river valley. *Cornell vet.* 42, 1952, p. 159-89.

Ui J. – Mercury pollution of sea and fresh water. Its accumulation in water biomass. *Rev. Int. Oceanog. Med.* Fr., 1971, 22-3, p. 79-128, bibl.

Ukeles R. – Growth of pure cultures of marine phytoplancton in the presence of toxicants. *Journ. applied. Microb.* 10, 1962, p. 532-7.

USDA. – *The World Food Budget.* Economic Research Service, 1965, Foreign Agricultural Economic Report n° 19.

Varney R. et Mac Cormac B.M. – Atmospheric pollutants in *"Introduction to the scientific study of atmospheric pollution".* Reidel ed., 1971, p. 8-52.

Viratelle G. – L'Inde à nouveau menacée de disette. *Le Monde,* 18-19 Février 1973, p. 1 et 4.

Wagle R.F. et Kitchen J.H. – Influence of fire on soils nutrients in a Ponderosa pine type. *Ecol.,* vol. 53, 1972, n° 1, p. 118-25.

Walford C. – The famines of the world : past and present. *Royal. Stat. Soc. Journ.* vol. 14, 1878, p. 433-526.

Way J.M. – Toxicity and hazards to man, domestic animals, and wildlife from some commonly used auxin herbicides. *Res. Rev. Germ.* 1969, 26, p. 37-62.

B. Weinstock et H. Niki. – Carbon monoxide balance in nature *Science, vol. 176, avril 1972, p. 290-2.*

Wellemeyer F., Lorimer F., Ogden G. et Desmond A. – How many people have ever lived on earth ? *Population Bulletin.* Pop. ref. bureau. Inc. Washington, vol. XVIII, Fev. 1962, n° 1, p. 1-19.

Westöö G. – Determination of Methyl Mercury compounds in food stuffs. *Acta. Chem. Scand.,* 20, 1966, p. 2131-7.

Westlake W.E. et Gunther A. – Occurence and mode of introduction of pesticides in the environment. *Adv. in Chem. Ser.* n° 60, 1966, p. 110-121.

Wharton C.R. – The green revolution, Cornucopia or Pandora box ? *Foreign affairs USA,* 47, 1969, p. 464-76.

Wheatley G.A. – *The persistence, accumulation and behaviour of organochlorine residues in soil.* Proc. Int. Cong. Entomol (12e), Londres, 1964 (1965), p. 556-7.

Whittaker R.H. – *Communities and ecosystem.* Mac Millan, 1972, 158 p.

Wiemeyer S.N., Mulhern B.M., Ligas F.J. et coll. – Residues of organochlorine pesticides, PCBs, and Mercury in bald eagle eggs and changes in shell thickness – 1969 et 1970. *Pest. Monit. Journ., USDI,* vol. G, n° 1, Juin 72, p. 50-5.

Wilkinson A.T., Finlayson D.G. et Morley H.V. – Toxic residues in soil 9 years after treatment with aldrin and Heptachlor. *Science,* 143, 1964, p. 681-2.

Wilson C.L. et Matthews W.H. et coll. (126). – *Man's impact on the global environment : Assessment and recommendations for action.* Ouvrage collectif dirigé par ces deux auteurs et rédigé avec l'aide de 8 collaborateurs principaux et 126 participants. Massachussetts Institute of Technology Press, Cambridge Mass, 1970 (319 pages).

Wilson D.F., Swinnerton J.W. et La Montagne R.A. – Production of Carbon monoxide and gazeous hydrocarbons in seawater : relation to dissolved organic carbon. *Science,* vol. 168, 26 Juin 1970, p. 1575-9.

De Witt J.B., Stickel W.H. et Springer P.F. – Effects of pesticides on birds in *"Wildlife studies", Patuxtent Wildlife research center,* 1963, USDA ed., 167, p. 74-96.

De Witt J.B. – Effects of chlorinated hydrocarbons insecticides upon quail and pheasants. *Journ. Agric. Food. chem.* 3, 1955, p. 672.

De Witt J.B. et George J.L. – Directs effects of pesticides on field populations : C – Agricultural pest-control, imported fire-ant. in *"Pesticide-Wildlife review 1959, Bureau of sport fisheries and Wildlife",* 1960, circul. n° 84, p. 7-13, U.S.D. Int. ed.

Woodwell G.M. – Toxic substances and ecological cycles. *Scient. Amer.,* n° 3, 1967, p. 24-31.

Woodwell G.M. – Effects of pollution on the structure and physiology of ecosystem. *Science,* vol. 168, 1970, p. 429-32.

Woodwell G.M. – The energy cycle of the biosphere. *Sci. ann.,* vol. 223, n° 3, 1970, p. 45-53.

Woodwell G.M., Graigg P.P. et Johson H.A. – DDT in the biosphere : where does it go ? *Science,* 174, 1971, p. 1101.

World populations prospects as assessed in 1963. United

Nations, Dept of Econ. and Soc. affairs. *Populations studies,* n° 41, New-York, 1966, 149 p.

Wright B.S. – Wood cock reproduction in DDT-sprayed areas of New-Brunswick. *J. Wildlife Management,* 24, 1960, p. 419-20.

Wuhrmann K. – Stream purification *in* Mitchell R. *"Water pollution microbiology"* Wiley Interscience ed., 1972, p. 119-51.

Würgler F.E. – Induced mutations and lethality in *Drosophila* after X-irradiation of meiotic and prost meiotic stages of the egg. Proc. Symp. on Effects of radiations on meiotic systems, 8-11 Mai 1967, AIEA Vienne, 1967, p. 43-62.

Wurster C.F. – DDT reduces photosynthesis by marine plankton. *Science,* 159, 1968, n° 3822, p. 1474-5.

Wurster D.H. Wurster C.F. et Strickland W.N. – Bird mortality following DDT spray for dutch elm disease. *Ecology,* vol. 46, n° 4, 1965, p. 488-99.

Yeatman L. – La protection de la nature au Brésil. *Cour. Nat. l'homme et l'oiseau.,* n° 20, 1971, p. 148-57.

Yemm E.W. et Willis A.J. – The effects of maleic hydrazide and 2,4 D on roadside vegetation. *Weed Res.* 2, 1962, p. 24-40.

Young G. – Dry land and desalted water. *Science,* 1970, vol. 167, n° 3917, p. 379-43.

Zermatten M. – Le rôle des réserves du point de vue touristique et esthétique. in *"Derniers refuges"* UICN. Elsevier ed., 1956, p. 43-6.

La bibliographie sur laquelle s'est fondée la rédaction de cet ouvrage a été arrêtée à la date du 20/2/1973.

II – COMPLEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES DE LA SECONDE EDITION

Amiard-Triquet C. et Amiard J.C. – La pollution radioactive du milieu aquatique et ses conséquences écologiques. *Bull. écol.,* t. 7, 1976, n° 1, p. 3-32.

Bernhard-Reversat F. – Recherches sur l'Ecosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. VI – Les cycles des macroéléments. *La Terre et la Vie,* 2, 1975, p. 229-54.

Clark J. et Brownell W. – Electric power plants in the coastal zone : Environmental issue. *Am. littoral Society* – spe. pub. n° 7, oct. 1973, 70 p.

Duvigneaud P. – *La Synthèse écologique.* Doin éd., 1974, 296 p., fig., pl.

Frejka T. The prospects for a stationary world population. *Sci. am.* vol. 228, n° 3, mars 1973, p. 15-23.

Huttel C. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Basse Côte d'Ivoire. II – Inventaire et structure de la végétation ligneuse. *La Terre et la Vie,* 2, 1975, p. 178-191.

Huttel C. et Bernhard-Reversat F. – Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de Côte-d'Ivoire. V – Biomasse végétale et productivité primaire. Cycle de la matière organique. *La Terre et la Vie,* 2, 1975, p. 203-227.

Justyn J. et Lusk S. – Evaluation of natural radionuclide contamination of fishes in streams affected by uranium ore mining and milling. *Zool. listy,* Čekol, 25, 1976, n° 3, p. 265-74.

Kesler S.E. – *Our finite mineral resources.* Mac Graw Hill ed., 1976, 120 p.

Khalanski M. – Etudes réalisées en France sur les conséquences écologiques de la réfrigération des centrales thermiques en circuit ouvert.

Lieth H. et Whittaker R.H. – *Primary productivity of the biosphere.* Springer-Verlag, 1975, 339 p.

Lorius C. et Duplessy J.C. – Les grands changements climatiques. *La Recherche,* n° 83, nov. 77, vol. 8, p. 947.

Peres J.M. – *La pollution des eaux marines.* Gauthier-Villars, 1976, 230 p., pl. couleur, N et B.

Pesson P. – *La pollution des eaux continentales, incidences sur les biocoenous aquatiques.* Ouvrage collectif, Gauthier-Villars, 1976, 285 p.

Pimentel D., Hurd L.E., Belloti A.C. et coll. – Food production and the energy crisis. *Science,* vol. 182, 1973, n° 4111, p. 443-9.

Ramade F. – Crise de l'énergie et ressources. *Bull. Ecol.,* T.5, 1974, fasc. 3, p. 185-206.

Ramade F. – *Ecotoxicologie.* Masson éd., 1977, 205 p. fig.

Rochlin G.I. – Nuclear waste disposal : two social criteria. *Science,* vol. 195, 7 janvier 1977, p. 23.

Rodot M., Deflandre J., Etievant J.C. et Peube J.L. – Les centrales solaires. *La Recherche,* n° 84, décembre 1977, vol. 8, p. 1038-48.

Simmons I.G. – *The ecology of natural resources.* Arnold ed., 1974, 424 p.

Slesser M. – Energy requirements of Agriculture in Lenihan J. et Fletcher W.W., *Environment and man,* vol. 2, Food. Agriculture and the environment. Blackie ed., vol. 2, 1975, p. 1-20.

Smith F. et coll. – Phosphorous cycle in *Man in the living environment.* Inger et Hasler ed., Wisconsin U.P., 1972, p. 48-58.

Steinhart J.S. et Steinhart C.E. – Energy use in the U.S. Food system. *Science,* vol. 184, Avril 1974, n° 4134, p. 307-16.

Truhaut R. – Ecotoxicologie et protection de l'environnement in *Abstr. coll. mondial "Biologie et devenir de l'homme",* en Sorbonne, sept. 1974 (1976), p. 101-121. (Mac Graw Hill ed.).

Watt K.F. – *Principles of environmental science.* Mac Graw Hill ed., 1973, 319 p.

Whittaker R.H. – *Communities and Ecosystems.* Mac Millan ed., NY et Londres, 1975, 385 p.

BRAS CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

GLOSSAIRE

Aérobies

Organismes qui ne peuvent produire leur énergie biochimique en l'absence d'oxygène.

Anaérobies

Organismes capables de produire leur énergie biochimique en l'absence d'oxygène.

"Aérosols"

Particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

Autotrophes

Organismes photosynthétiques et, de ce fait, capables de subvenir à tous leurs besoins biologiques à partir d'eau, de sels minéraux et de lumière solaire.

Biocœnose

Ensemble des êtres vivants (microorganismes, plantes, animaux) qui peuplent un même biotope.

Biomasse

Masse totale des êtres vivants pris dans leur ensemble ou par groupe systématique, par unité de surface dans un biotope donné et à un instant donné. On parlera p.e. de biomasse végétale, d'insectes, d'herbivores, de carnivores, etc.

Biome

Unité écologique de très vaste étendue, recouvrant une fraction d'un ou de plusieurs continents et caractérisée par un ensemble d'espèces végétales et animales qui lui sont spécifiques.

Biosphère

Région de la planète qui renferme l'ensemble des êtres vivants.

Caducifoliée

Se dit d'espèces ou de communautés végétales qui perdent leur feuillage quand les conditions écologiques deviennent défavorables (hiver ou saison sèche selon le cas). On distingue p.e. des forêts caducifoliées tempérées ou tropicales.

Caléfaction des eaux

Néologisme désignant la pollution des eaux par la chaleur produite par diverses installations industrielles (centrales électriques p.e.).

Chaînes trophiques (= alimentaires)

Ensemble des organismes qui assurent successivement le transfert de la matière dans un cycle biogéochimique. Elles comportent toujours des producteurs (plantes vertes), des consommateurs herbivores et carnivores (animaux), enfin des décomposeurs qui assurent la minéralisation des déchets organiques.

Climax

Communautés terminales de successions végétales en équilibre avec le climat et les divers facteurs écologiques des biotopes et, de ce fait, non susceptibles d'une évolution ultérieure en l'absence de toute perturbation.

Chloroplastes

Organites des cellules végétales qui renferment les pigments chlorophylliens et où s'effectue la photosynthèse.

Cycle biologique

Ensemble des stades par lesquels passe un être vivant, depuis l'union des cellules sexuelles (gamètes) jusqu'à sa mort.

DL 50

Dose d'un toxique provoquant 50 % de mortalité dans une population d'une espèce déterminée après un temps d'application donné.

Dysclimax

Terme ultime d'une succession dans un milieu dont la communauté climacique a été éliminée par des facteurs naturels ou artificiels et qui aboutit à un climax différent de celui qui existait à l'origine.

Ecophase

Stade du développement ou du cycle vital d'une espèce adaptée à une niche écologique particulière. La chenille, la nymphe et le papillon adulte représentent autant d'écophases d'une même espèce de Lépidoptère.

Ecosphère

Ensemble formé par la biosphère et les milieux parabiosphériques (haute atmosphère, couches sédimentaires profondes).

Ecosystème

Ensemble du milieu physico-chimique (biotope) et des êtres vivants qui le peuplent (biocoenose).

ICU-SI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Ecotone

Territoire qui marque la frontière entre deux écosystèmes. Cette zone de transition est colonisée de ce fait par des organismes appartenant aux communautés voisines et par un certain nombre d'espèces ubiquistes.

Edaphique

Qualificatif désignant les facteurs écologiques propres aux sols ou les organismes inféodés à de tels milieux.

Endogé

Se dit d'un organisme qui vit à l'intérieur du sol.

Equilibre naturel

Etat d'un écosystème dans lequel les entrants et les sortants de matière et d'énergie se réajustent perpétuellement, de sorte que l'ensemble des populations qui le peuplent sont en équilibre dynamique.

Eutrophisation des eaux

Surfertilisation artificielle des eaux résultant de pollutions agricoles et urbaines. Il en résulte une prolifération des algues avec diminution de la teneur en oxygène dissous dans les couches profondes par suite de la décomposition des matières organiques mortes ainsi produites et une sédimentation accrue. L'eutrophisation provoque donc un vieillissement accéléré des eaux superficielles continentales.

Habitat

Milieu inerte et biologique qui constitue l'environnement d'une espèce considérée. C'est en quelque sorte l'écosystème considéré par rapport à une espèce ou un organisme.

Hétérotrophes

Etres vivants ayant besoin d'aliments organiques pour assurer leurs fonctions métaboliques. Tous les animaux, certaines plantes vasculaires parasites, les champignons et certaines bactéries sont hétérotrophes.

Homéostasie

Capacité d'autorégulation d'un système biologique lorsque varient les conditions du milieu.

Humus

Constituant essentiel des sols formé par un mélange de matières organiques végétales et animales en voie de décomposition.

Ombrophile

Ce qualificatif désigne les forêts tropicales humides, caractérisées par une forte pluviométrie pendant toute l'année et un très faible éclairement au niveau du sol et des strates végétatives inférieures. La plupart des espèces d'arbres qui la composent sont d'ailleurs tellement adaptées à ces conditions particulières de pénombre qu'ils ne peuvent germer et croître pendant le début de leur vie que dans des conditions de faible éclairement d'où le terme d'ombrophile.

Orophile

Désigne les facteurs écologiques propres aux hautes montagnes et les espèces qui y vivent.

Photosynthèse (ou assimilation chlorophyllienne)

Synthèse par les plantes vertes de la totalité des substances biochimiques fondamentales à partir d'eau et de sels minéraux grâce à l'aptitude des chloroplastes à capter une fraction de l'énergie solaire.

Podzol

Type de sol des régions froides et humides, qui par suite du lessivage est fortement appauvri en éléments nutritifs dans ses couches superficielles.

Productivité

Masse de matière vivante synthétisée par les végétaux, les animaux ou l'ensemble des espèces constituant la biocœnose par unité de surface et par unité de temps.

Polluant

Substance introduite artificiellement par l'homme dans la biosphère ou qui existe dans les conditions naturelles mais dont le taux est accru par la civilisation technologique.

Radionucléides

Isotopes radioactifs naturels ou artificiels d'un élément.

Ripicole

Organisme qui vit sur les rives d'un cours d'eau ou d'un lac.

Saprophage

Espèce qui se nourrit de matières organiques animales ou végétales en décomposition.

Saprophyte

Végétal qui croît sur des matières organiques en décomposition.

Succession

Phénomène caractérisé par une évolution des communautés vivantes dans un sens progressif ou régressif en un biotope donné sous l'effet d'une variation d'un ou de plusieurs facteurs écologiques.

Thérophytes

Plantes annuelles à période végétative de brève durée, dont le cycle vital complet, de la graine à la graine s'effectue tout au plus en une saison.

EAST CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

INDEX DES MATIERES

A

Abiotiques, 19, 539
Accroissement démographique, 149 et suiv.
(voir aussi croissance)
Acides aminés, 12, 71, 74, 75
Acides nucléiques, 74
Acide phénoxyacétique, 287
Aciéries, 210
Acroléine, 198
Adénosine-tri-Phosphate, (ATP), 16, 65, 66, 74
ADN, 408, 414
Adventices (plantes – des cultures), 294, 295
Aérosols, 171, 208, *209*, 210, 216, 217
(voir aussi poussières)
Afrique, 177, 216, 235, 236, 462, 483, 486
Ager, 104, 109, 114, 464
Agriculture, 113, 456, 514, 518
(détérioration de l'environnement provoquée par l'), 113 et suiv, 462, 468
Agroécosystèmes, 92, 94, 114, 523 et suiv.
Agung (Mont), 215, *225*, *233*, 238
Air, 187, 189
Aitken, (noyaux = particules d'), 187, 209, 213, 219
Albedo, 224, 225, 226
Aldéhydes, 198
Aldrine, 291
Alevins, 307, 308, 374
Algues bleues, 71, 280, 349, 358, 395
Algues vertes, 349, 350, 359, 395
Alimentaires, (disponibilités)
Alimentation, *517* et suiv.
Alkylbenzène sulfonates linéaires (= LAS), 338
Alpes-maritimes, 384
Alumine, 208
Aluminium, 208, 209
Amazonie, 3, 216, 463
Amérique du Nord, 33, 164, 457, 458, 459
Amérique Latine, 121, 130, 131, 132, 520
Amiante (= Asbeste), 211, 269
Aminotriazole, 288, 369
Ammoniaque, 71, 367, 368
Angara, 330
Angleterre, 256
Antarctique (contamination de l'– par les pesticides), 340
Anhydride carbonique, (voir CO_2)
Anhydride sulfureux, (voir SO_2)
Arcachon, 331
Aridification, 115, 221
Arsenic, 276, 284
Asbeste (voir Amiante)
Asie, 130, 131, 132, 472, 486, 517, 518
du Sud-est, 235, 485
Assèchement (des marais), 491
Atlantique (Océan), 43, 333, 373
Atmosphère, 11 et suiv. 45, 64, 68, 70,172 et suiv.*187* et suiv. 191, 192, 375 et suiv, 436
suiv. 161 et suiv., 265, 266, 354, 355, 384, 385, 394
Composition de l', 137
Structure de l', 172 et suiv.
Attractifs sexuels, 319
Australie, 34, 35, 235, 484, 487
Automobile, 166, 168, 194, 297, 212, 220, 332, 338
Autotrophes, 13, 20, 86
Avifaune, 296 et suiv., 490
Azodrin, 312
Azote, 12, *70* et suiv., 279, 280, 356

B

Bactéries
aérobies, 70, 196, 331
Anaérobies, 70, 196, 255, 347
autotrophes, 12, 70
décomposeurs, 51, 331
hétérotrophes, 71, 255, 347, 348
nitrifiantes, 70, 71, 349
symbiotiques, 71
"*Bad lands*", 472
Barrage d'Assouan, 473
Barrage de Serre-Ponçon, 475
Baryum, 333
Bassin d'Arcachon (voir Arcachon)
Bathyal (étage), 49
Benthique
faune, 371
zone, 339, 362, 363
Benzanthracène, 197, 368
Benzopyrène, 197, 368
Bermudes (Iles), 333, 342
Bicarbonates, 251
Bielowieza (fôrêt de), 456
Biocoenoses, définition, 19
dégradation des *453* et suiv.
diversité des, 106, 118, 312
Biogéochimiques, (voir aussi cycles) 17
Biomasse, 21 et suiv., 84 et suiv., 92 et suiv., 435, 455
Biocosmiques (matières), 12
Biomes, 17, 19 et suiv.

IAS/CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Biosphère, 7
définition, 11
dégradation, 111
évolution chronologique de la, 12,14
flux de l'énergie dans la, 49, 80
pollution de la, 159
subdivisions de la, 21, 45
Biotopes, 19, 113, 489
Bitume, (pollution des océans par le), 373
Bovins, 460, 475, 539
Brome, 207, 211, 220
Bronchite chronique, 267, 268
Brouillards, 239, 240, 241

C

Cadmium, 177, 273, 333
Calcaires, 12, 64, 67
Calcium, 12, 64, 469
Calcutta, 133
Caléfaction des eaux (voir Pollution des eaux)
Californie, 29, 31, 32, 35, 36, 337, 375
Calottes Glaciaires, 60, 212, 227
Camargue, 40, 62, 487, 488, Pl. XXVII
Capacité limite
du milieu, 137
des pâturages, 475
Carbamates insecticides, 287
Carbaryl (voir Sevin)
Carbonates, 12, 64, 251
Carbone, *63* et suiv., *245* et suiv, 251, 252, 253, 410, 411
Cycle biogéochimique du 63 et suiv.
perturbations du cycle du, 245 et suiv.
Carbone^{14}, 251, 252, 409 et suiv.
Caribou, 181
Carnivores, 39, 51, 52, 53, 84, 87
Caspienne, 330
Caucase, 187, 217, 218
Cendres volcaniques, 220, 225
Centrales nucléaires, 387, 403, 435 et suiv.
Centrales thermiques, 387 et suiv.
Cesium^{137}, 168, 180, 411, 412, 427, 433, 439
Chaîne (trophiques) 51, 52, 53, 54, 55, 56, 178 et suiv., 300, 375 et suiv., 380 et suiv., 441 et suiv.
de parasites, 53
de prédateurs, 36, 52
saprophytiques, 38, 54
Champignons, 20, 51, 255, 287, 346, 347
Chaparral, 32, 466
Charbon, 67, 165, 190, 201, 211, 247 et suiv.
Chasse, 477, 487, 488, 510
à la baleine, 492 et suiv.
Chasseurs, 487, 488
Chicago, 211, 214, 242, 243
Chimiostérilisants, 320
Chine
déforestation en, 33, 456
démographie de la, 154, 155
Chlore, 270, 334
Chlorophylle, 16, 81, *82*, 261, 359
Chlorure de vinyle, 381
Chromates, 365
CL. 50, 365 et suiv.
Classes d'âge, 141, 142
Climats, 23, *234* et suiv.
effet des aérosols sur les, 230
effets du CO_2 sur les, 226
Climatiques. modifications, 221 et suiv., 230, *234*, 235, 236 et suiv.
Climax, 99, 461
Cobalt, 276
CO, 193 et suiv.
CO_2, 12, 13, 64, 65, 66, 67, 68, 190, *191*, 226, 227, 228, 229
CO_2, interférence du – atmosphérique avec les températures globales, 226 et suiv.
production de, d'origine industrielle, 192
volume du réservoir biosphérique de, 250, 251
volume au réservoir océanique de, 251
taux atmosphérique, 12, 64, 246, 247
Coefficient intrinsèque d'accroissement, 135 et suiv.
de mortalité, 135, 145
de natalité, 135, 145
Coliformes, 331
Combustibles fossiles, 120, 166, 190, 191, 248, *506*, 507, 509
Combustions, 191, 197, 207, 208, 279
Communautés végétales, 21 et suiv., 459 et suiv.
Composés de l'azote (= — nitrés), 167, 190, 191, *202*, 203, 204, et suiv., 262
Conifères, 34, 36, 37, 257 et suiv., 465
Congo, 61
Consommation
d'eau, 516, 529
d'énergie, 165, 506 et suiv.
Consommateurs, Pl. XI et XII, 51, 52, 85, 87
Contamination des aliments par les radionucléides, 182, 430, 431
Contamination des animaux
par les pesticides, 178 et suiv., 203 et suiv.
par les radionucléides, 180, 181
Contamination
de l'atmosphère, 174, 181
des chaines trophiques
par le mercure, 180
par les pesticides, 179, 183
par les radionucléides, 180, 181
des océans
par le mercure, 180
par les pesticides, 179
par les radionucléides, 432 et suiv.
des sols
par les pesticides, 282 et suiv.
par les radionucléides, 181, 412, 427
des végétaux
par les pesticides, 298
par les radionucléides, 181
Copépodes, 44
Coquilles (des œufs d'oiseaux), 302 et suiv.
Coraux (voir récifs coralliens)
Coupe des forêts 454 et suiv.
Courbe logistique, 136, 137
du potentiel biotique, 136
de survie, 139, 140, 418
Couverture nuageuse, 224, 232, 233
Crétacé, 13, 14

BU IAST / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Croissance
démographique, 122 et suiv.
industrielle, 120, 121, 505
de la levure, 137
du cheptel ovin à Tasmanie, 138
Cryolithe, 208
Cuivre, 276
Cyanures, 368
Cycles biogéochimiques, 57, 59, 74, 79, 118, *244*, 248, 249, 281, 282
Cycle de l'Azote, 70 et suiv., 279 et suiv.
du carbone, 63, 64, 65, 245, 248
de l'eau, 59 et suiv.
de l'oxygène, 68, 69, 252
du phosphore, 77 et suiv., 281, 282
du soufre, 75, 76, 254, 255, 256
Cycle de Calvin, 16
de Krebs, 65
Cycle de la matière, 49, 50, 117, 118, 119
Cycle de production d'un combustible ou d'un minerai, 509
Cyclodiènes, 286
Cystéine, 176, 255

D

DBO, 331, 332, 348
DBO_5, 331, 332, 348, 349, 358, 359
DDE, 299 et suiv., 305
DDT, 169, 283, 285, 289, 310, 339, 340, 341, 342
accumulation dans la biomasse 299 et suiv., 315, 316
dans les sols, 292
concentration dans les chaines trophiques, 183, 375, 376
effets sur la reproduction avienne, 303, 304, 305
sur le phytoplancton, 366, 375
effets sur les poissons, 307, 308
DDVP, 286
Déboisement, 115, 454 et suiv., Pl. XXI. XXIII. XXV
Déchets radioactifs, (voir résidus)
Déchets solides, 167
Décomposeurs, 20, 51, 56, 84, 86, *87*, 117, 118, 349
Déficit d'insolation urbain, 244
Déforestation, (voir déboisement)
Dégradation oxydative, 65
Demande biochimique d'oxygène (voir DBO)
Démoécologie du surpeuplement, 134 et suiv.
Démographie, 11, 122 et suiv.
Démographique (s)
croissance, 122 et suiv.
des grandes régions du monde
du tiers-monde, 125, 132
explosion, 122
prospectives, 147
stabilisation, 147, 148, 149, *150* et suiv.
Démoustication (effets sur la faune), 375
Dénitrification, 74, 280, 281
Densité
des populations humaines, 124, 129
des populations animales, 134
Dérivés de l'azote (= nitrés), 202 et suiv., 262
Dérivés halogénés, 207
Déserts, 28 et suiv., 250, 460, Pl. III
Désertification, 3, 4, 115, 221, *460*
Destruction de la végétation, 453 et suiv.
Détersifs, 335, 370, 371
2.4 D, 285 et suiv., 305
2.4.5 T, 286 et suiv, 369
Dévonien, 13, 14
Diatomées, 44, 101, 349, 395
Dieldrine, 177, 178, 179, 286, 287, 339
Diésel, 197, 198
Dinitrocrésols, 287
Diversité (voir biocoenoses)
Diuron, 288, 315
DL 50, 417, 424
Dôme de pollution, 241 et suiv.
Donets, 329
Doses léthales, 318, 319, 415
"Dust Bowl", 216, 472
Dynamique des populations, 134 et suiv.
Dysclimax, 466
Dystrophisation (des eaux), 356 et suiv.

E

Eau
consommation, 516
cycle de l', 59
vapeur d', 60, 53
Eaux, 59 et suiv., 325 et suiv. 514 et suiv., 529
continentales, 60, 64, 325, 514
eutrophisation, 302 et suiv.
fluviales, 327, 328, 329
pollution (voir pollution des eaux)
souterraines, 60, 61
Ecdysone, 321
Ecophases, 55
Ecosphère, 148, 505
(voir aussi biosphère)
Ecosystèmes, 18, 21, 57, 89
classification, 21
définition, 19
dégradation, 117
productivité (voir productivité)
zonation, 21
Effet
Pasteur, 68
de serre, 223, 226
Suess, 251
Effluents, 330, 331, 332, 356
Embruns marins, 255
Emphysème, 268
Endrine, 286, 291, 368
Endosulfan, 2, 368
Energie éolienne, 512
Energie,
consommation, 165, 506 et suiv.
crise de l', 120, 448, *507*, 511
flux de l', 13, 21, 66, 80, 89, 116 et suiv.
perturbation du, 117 et suiv, 523 et suiv,
géothermique, 506
marémotrice, 506
production d'– par la civilisation industrielle, 165, 506, 507
nucléaire, 192, 444, 448, 511
solaire, 80, 81, 82, 116, 117, 118, 506, 513

UNESCO / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Energétiques (voir ressources)
Engrais chimiques (voir fertilisants)
Entocon, 321
Entomophages, 54, 315, 316
Eozoïque, 14
Epidémies, 124, 126, 330, 331
Epiphytes, 25, 259
Epilimnion, 353, 355
Ere utile (d'un combustible), 508, 509, 510
Erosion
  éolienne, 216, 217, 472
  hydrique, 474
  des sols, 472 et suiv., Pl. XXIII et XXIV
Espagne 456, 457
Esquimau, 181
Essence, 254, 333
Esters phosphoriques 344
  (voir aussi insecticides)
Etage (= zones)
  abyssal, 45
  alpin, 47
  bathyal, 45
  collinéen, 47
  montagnard, 47
  subalpin, 47
  de végétation, 47, Pl. X
Etats-Unis, 458, 459, 469, 476
Ethylène, 263
Eucaryotes, 13
Eutrophisation des eaux, 352 et suiv.
Evaporation, 60
Evapotranspiration, 61, 62, 63, 468, 529
Explosions
  démographiques, 122
  nucléaires 180, et suiv., 426
Extermination de la faune, 477 et suiv.

F

Facies lentique, 345
  lotique, 345
Famines, 121, 124, 125, 126
FAO, 430, 431
Faune, 33, et suiv. 477 et suiv.
Fermentations, 66, 346, 364
Fer, 75, 76
  sesquioxyde de , 18, 68
Fertilisants, 118, 119, 120, 167, 254, *273* et suiv. 334, 516
Feux, 112, 459, 464 et suiv.
  de brousse, 462, 468 (voir aussi incendies)
Feuillus, 455
Fibrocytose (voir silicose)
Fleuves, 63, 76, 327, 328, 329, 389 et suiv.
Florence (inondations de), 3
Fluor, 207, 263, 266, 267
Fluoranthrène, 197, 268
Fluorose, 266, 267
Fluorures, 171, 211
Flux de l'énergie (voir énergie)
Flux solaire, 12, 80, 81, 82, 222, 506
Fongicides, 287
Fontainebleau (forêt de), 456
Forages pétroliers, 336, 337
Forêts
  boréales, 38, 459
  caducifoliées, 38, 104, 105
  de Conifère, 38, 466
  destruction des, 130 et suiv.
  hercynienne, 456
  incendies de, 459 et suiv., Pl. XXI, 464
  méditerranéennes, 459 et suiv.
  ombrophiles, 23, 462, 463
  régénération des, 456
  sclérophylles, 32, 459, 461, Pl. IV
  sempervirentes, 23, 32, Pl. V
  superficie des 456, 458, 459
  tropicales, 23 et suiv, 461 et suiv.
  vierges, 456, 463
Fos-sur-mer, 188, Pl. XIX, 339, Pl. XX, 369 Pl. XXVII, 488
Fruticée, 313
Fuels, 198, 199, 210
Fumeurs, 268, 269
Fumure minérale, 276, 289
Fusion thermonucléaire, 511
Futaie jardinée, 454

G

Galvanoplastie (pollution par la), 334
Garrigues, 32, 459, 461
Gaz carbonique (voir CO_2)
Glaciaires (époques), 227, 238, 353
Glaciations, 14, 15, 227
Grande Bretagne, 182, 209
Grands lacs, 329, 361, 362, 363
Groenland (contamination par le plomb), 212
Guano, 78, 79, 281, 282
Guerres, 126, 127
Gypse, 76, 275

H

Habitat, 18
Hadley (cellule de), 175
Haies, 491
Hawaï (Iles), 490
Heptachlore, 286, 291, 298, 299, 375
Herbicides, 287 et suiv., 365
Herbivores, 51, 52, 53, 84, 85, 86
Hétérotrophes, 20, 51, 65, 66, 99
Hêtraies, 456, Pl. VI
Homéostasie des écosystèmes, 117
Hormones, 304, 320
Humidité atmosphérique, 60
Humification, 66
Humus, 60, *66*, 249, 279
Hydrocarbures, 67, 166, 197, 247, 268
  aromatiques, 197
  carcinogènes, 268
  polycycliques, 197, 268, 269
  pollution par les, 197, 335, 369
Hydrogène sulfuré (voir SH)
Hydrosphère, 11, 14, 15, 45, 59, 68, 69, 247 et suiv., 273, 327, 335, 378
Hypolimnion, 353, 355

BRUNEL CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

I

Iles
Barbades, 292
de la mer des Caraïbes, 491
de Cuba, 491
Galapagos, 492
Hawaï, 490
Illinois, 334
Incendies
de forêts, 115, 195, 459, Pl. XXI
de prairies, 113
(voir aussi feux)
Incinérateurs, 191, 195, 279
Indes, 126, 127, 128, 143, 149, 485,
Infiltration, 60, 61
Infra-rouge, 222, 223, 226 et suiv.
Insecticides, 283 et suiv.
accumulation dans les écosystèmes, 299 et suiv.
carbamates, 287
effets sur l'avifaune, 296 et suiv., 377
sur les invertébrés aquatiques, 308, 321, 327
sur le phytoplancton, 366, 375
sur les poissons, 307, 369, 376
organochlorés, 286
organophosphorés (= esters phosphoriques), 286
transport atmosphérique des, 291, 340
Insolation, déficit d', 242, 243
Inversion de température, 239 et suiv.
Iode ^{131}, 168, 181, 428, 429, 430
Irrigation, 468, 469, 516, 517, 525, 529
Isère (pollution des eaux de l'), 339
Israël, 460
Italie, 474

J

Jurassique, 13, 14
Juvabione, 321

K

Kenya, 353, 462, 468, 484
Kilimandjaro, 236
Krakatoa, 219
Krypton^{85}, 411, 436

L

Lacs 40 et suiv.
d'Annecy, 368, Pl. XX
Baïkal, 42, 330, 516
Clair (Clear Lake), 375
Crater Lake, Fig. 1,6 d, 540, Pl. XXIX
Erié, 329, 363, 364, 365
Grands, 329, 355
Léman, 352, 359
Ontario, 329
Michigan, 354
de Serre-ponçon, 474, 475
Washington, 358, 359
de Zürich, 358, 364
Lac oligotrophe, 41, 42, 353, 354
Lacq (pétrochimie de), 254
Lamarck, 9, 11
Languedoc, 459
Lapons, 180
Latérisation, 470, 471
Latérites, 470, 471
Légumineuses, 71, 127
Lentiques (écosystèmes –), 40 et suiv., 370 et suiv.
Lichens, 180, 181, 258 et suiv. Pl. XV
Limniques
milieux, 40 et suiv., 345 et suiv.
organismes, 352
Lindane, 283, 285, 286, 292, 375
Lindeman (loi de), 88, 522
Linné, 18
Lithosphère, 11 et suiv., 45, 64, 118, 119, 247
Longévité
moyenne, 139
potentielle, 205
Los Angeles, 205, 231, 240, 241
Lotiques (écosystèmes) 42, 345 et suiv.
Lumière, 17, 21, 80
Lutte (contre les ravageurs)
autocide, 318, 319
biologique, 314 et suiv. Pl. XVIII
chimique, 289

M

Macroclimats, 222 et suiv.
Macroécosystèmes, 21,
Macrophytes, 354
Madagascar, 462
Mahgreb, 460
Malthus, 133
Mangrove 295, Pl. XXV, 476
Maquis, 32, 459
Marée noire, 2, 370, 372
Matières
fertiles, 512
fissiles, 435
organiques, 67, 249, 252, 332
plastiques, 279, 341, 343
premières, 513
Maurienne (vallée de la), 413
Méditerranée (mer), 372, 373, 459
Mer
Adriatique, 44
d'Aral, 353
Baltique, 343, 362, 364
Caspienne, 330
du Nord, 179
Noire, 75, 355
d'Okhotsk, 97, 492
des Sargasses, 168, 343, 373
Méditerranée, 372
(voir aussi océans)
pollution (voir pollution des mers)
Mercaptans, 202
Mercure, 169, 171, 213, 273, 287, 333, 378 et suiv.
acétate de phényl, 286, 287, 385, 386
diméthyl, 378
méthyl, 169, 378 et suiv.
silicate de méthoxyméthyl, 287

BUJACI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Mésoclimats, 238, 239
Mésolithique, 124, 143, 453
Mésosphère, 172, 215
Mésothéliome, 269
Métallurgie, 211, 332
Métaux lourds, 171, 273, 275, 276
Méthémoglobinémie, 277
Méthionine, 176, 255
Mexique, 32
Microorganismes, 51, 118, 255, 346 et suiv.
Miljet (forêt de), 459, Pl. IV
Minamata (maladie de), 333, 377
Minéralisation, 20, 56, 116, 117, 255
Modifications climatiques (voir pollution atmosphérique)
Mojave (désert de –) 29
Mont Agung (voir Agung)
Montagnes
  Biomes de, 47
  Rocheuses, 476
Monuron (herbicide), 288
Mortalité
  Coefficient de, 135
  histogramme de fréquence de – chez l'homme, 143
  par tuberculose aux Etats-Unis, 144
  Taux de – infantile, 145
Moteurs à explosion, 191, 197
Mousses, 60, 264
Mutations, 413, 421
Mutagènes (substances), 386
Mycélium, 287, 347

N

Navires pétroliers (voir pétrolier)
Nature (protection de la), 537 et suiv.
Nebraska 524, Fig. 9, 13
Nébulosité, 224, 232, 233, (voir aussi couverture nuageuse)
Necton, 248
Nématodes, 59
Néolithique, 113, 114, 115, 124, 143, 144, 453, 457, 539
Néoténine, 321
New-Brunswick, 307
Nickel, 276, 333
Nil, 62, 517
Nitrates, 44, 72 et suiv.
  dans les eaux, 334, 346, 349, 353
  dans les sols, 275, 277 et suiv.
Nitrification, 72, 73, 280, 281
Nitrites, 72, 73, 74, 277
NO, 72, 73, 202 et suiv.,
NO_2, 72, 73, 74, 202 et suiv.
Nomades, 461
Nuages, 224, 233
Nuageuse (couverture), 224, 232, 233
Nuisances, 171

O

Océans, 227
  Atlantique, 43, 333, 373
  Pacifique, 97, 213, 432, 433
  pollution par le mercure, 334
    par le pétrole, 335 et suiv.
    par le plomb, 332, 333
  pollution radioactive, 432 et suiv., 443
Oestrogènes, 305
Off-shore (voir forages)
Oklahoma, 216
Oiseaux,
  à guano, 500, 501
  effets de la pollution par les pesticides sur les, 299 et suiv.
  de mer, 78, 372, 377
  rapaces, 301 et suiv.
Organochlorés (insecticides), 285, 286
Organophosphates (insecticides), 285, 286
Organomercuriels (fongicides), 205, 287
Organophosphates (insecticides), 286
Origines de la vie, 12
Overfishing, 496, 497, 498
Oxydes
  d'azote, 190, 202, 203
  de carbone (voir CO)
  de fer, 68, 70, 470, 471
Oxygène, 12, 13, 66, 68, 70, 362
  Cycle biogéochimique de l' (voir cycles)
  dissous, 325, 326, 332
  taux atmosphérique, 12, 13, 68
Ozone, 13, 14, 68, 173, *180* et suiv., 233, 234, 262

P

Pacifique (voir océans)
Paléolithique, 113, 114, 124, 143, 453, 478
Paléozoïque, 228
Palétuviers, effets des défoliants sur les, 295
PAN, 189, *205*, 262, 267
Papier (industrie du), 331, 516
Parabiosphérique, 11, 45
Paraquat, 288
Parasites, 53, 325
Parc naturel de Camargue 487
Parcs nationaux, Pl. XXIX et XXX, 540, 541, Fig. 10,1
  des Arches, 540
  du Crater lake, 540, fig. 1,6 d
  des Ecrins, Fig. 10,1, 539
  d'Olympic 35, 36
  de Redwoods 35, 36
  du Grand Cañyon, 540
  de la Vanoise, 541
  de Yellowstone, 187, 482, 540
  de Yosemite, 540
Particules, 208 et suiv.
  d'Aitken, 209
  sédimentables, 208
  semi-fines, 209
  inframicroscopiques, 208
Pasteur (effet), 68
Pêche (effort de), 497
Pêcheries, 494 et suiv., 497
Pédologiques
  altérations, 469 et suiv.
  structures, 470
Pélagique, 494
Pelleterie, 485
Permafrost, 39

EDU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Peroxy-acyl-nitrates (voir PAN)
Peroxyde azotique (voir NO_2)
Pesticides, 283 et suiv., 339 et suiv.
cinétique dans la biosphère, 290
structures, 285
effets sur les entomophages, 309 et suiv.
effets sur l'avifaune, 299 et suiv., 316, Pl. XVII
biocoenotiques, 294
démoécologiques, 293, 297
sur la diversité, 312
effets sur la fécondité, 305, 312
effets sur le phytoplancton, 365, 366, 375
effets sur les poissons, 307, 308
effets sur la succession, 313
perturbation de la synthèse de la coquille des œufs, 302, 304
pollution des eaux, 339
Pesticides persistants, 291
Pétrole, 67, 165, 166, 187, 192, 201, 211, 248, 249, 253, 335 et suiv, 369, 507 et suiv.
consommation de, 506, 507
pollution des mers par le, 336 et suiv.
action sur les oiseaux marins, 2, 337, 372
le phytoplancton, 370
réserves mondiales de, 508, 509
Pétroliers, 2, 336, 337, Pl. XIX
pH des pluies, 199, 200, 256
Phénols, 343
Phosphates, 44, 77 et suiv., 117, 211, 275
dans les eaux, 77, 333, 349 et suiv.
océans, 97
super, 275, 276
engrais phosphatés, 275, 531, 532
Phosphore, 48, 77, 78, 79, 280, 356, 441, 446
cycle du, (voir cycles biogéochimiques)
Photochimique (pollution), 202
Photolyse, 16, 61
Photosynthèse, 13, 16, *17*, 64, 65, 66, 81 et suiv., 245 et suiv., 262
Phréatiques (nappes), 60, 63
Phytocoenose,
planctonique, 359
Phytoplancton, 13, 44, 77, 84, 85, 178, 248, 359, 365, 375, 375, 380, 443
Phytosanitaires (traitements), 282
Pichloram (herbicide), 285, 288
Pisciculture, 100, 101
Plateau continental, 45
Pleistocéne, 112, 235, 353, 453, 453, 477, 478
Plomb, 168, *211* et suiv., 242, 263 et suiv., 332, 333
Pluies. 23, 59, 254, 255
pH des, 199, 200, 256
Plumasserie, 485
Pluviométrie, 22
PNB (= Produit national brut), 164, 266
Podzolisation, 472
Poissons
effets des pesticides sur les, 369
ressources des pêcheries, 494 et suiv.
Polluants
accumulation dans la biomasse, 178
atmosphériques, 188 et suiv.
cinétique des, 173
circulation des, 172
classification des, 171
incorporation à la biomasse, 176, 177
Pollution(s), 161
classification, 171
définition, 170
historique, 163
Pollution atmosphérique, 187, 221, 226, Pl. XIII. XIV. XV. XVI.
conséquences biocoenotiques, 257 et suiv.
conséquences climatiques, 221 et suiv.
et cycles biogéochimiques, 244
effets sur les animaux, 266
sur les écosytèmes, 221
sur l'homme, 267
sur les macroclimats, 222
sur les mésoclimats, 238
sur les végétaux, 257 et suiv.
perturbation du cycle de l'azote, 254
du cycle du carbone, 119, 190, *245* et suiv., 250, 251, 252
du cycle de l'oxygène, 119, 252, 253, 254
du cycle du soufre, 190, 254 et suiv.
Pollution
de la biosphère, 159
des eaux, 325, 369, PL. XX.
nature et importance, 327
conséquences biocoenotiques, 369 et suiv.
microbiologique, 330
organique, 345 et suiv.
par les détersifs, 338, 339
par les hydrocarbures, 335 et suiv.
par le Mercure, 378 et suiv.
par les nitrates, 334, 353
par les pesticides, 339 et suiv., 375 et suiv.
par le pétrole, 336 et suiv.
par les phosphates, 335, 356
thermique (= caléfaction des eaux), 387 et suiv.
des mers
par les pesticides, 375 et suiv.
par le pétrole, 336 et suiv., 370 et suiv., Pl. XIX.
nucléaire, 407
des océans
par les hydrocarbures, 335 et suiv.
par les PCB, 341
par les retombées radioactives, 432, 433, 434
par les pesticides, 282
des sols, 181, 273, 274
par les fertilisants, 275 et suiv.
par les pesticides, 282 et suiv., (voir aussi pesticides)
Polychlorobiphénydes (PCB), 279, 305, 341
Polychlorovinyles, 279
Poliomyélite, 331
Polyphosphates, 338
Populations
croissance des, 122, 125, 128, 132, 149
densité des, 124, 128, 129
Poussières (= "aérosols")
d'origine industrielle 209 et suiv.
dans les neiges éternelles du Caucase, 187, 217, 218
d'origine volcanique, 208, *209*, 215 et suiv.

LOYOLA CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Prairie
alpine, 47, 48
tempérée (steppe), 36, 113
Précambrien, 14
Précipitations (voir pluies)
Prédateurs, 52, 309, 310
Prévisions démographiques, 132
Procaryotes, 13
Producteurs, 34, 51, 52, 53, 84, 85
primaires, 44, 85, 86
secondaires, 87 et suiv.
Production alimentaire, 121, 519
Production
primaire, 83, 85, 91 et suiv.
secondaire, 99 et suiv.
Productivité
des écosystèmes, 91 et suiv., 98 et suiv., 104, 105, 455, 500, 523
primaire, 83, 91 et suiv., 360
des grands biomes, 92, 93, 94
des océans, 92, 95
des lacs, 360
secondaire, 99 et suiv.
Proies, 84
Prospectives démographiques, 147
Protection de la faune, 539
Protection de la nature 537 et suiv.
Protéines, 71, 72, 75, 255, 518
Provence, 459
Pyramide
des âges, 141, 142
des biomasses, 85, 183
écologiques, 83
des énergies, 85 et suiv.
des nombres, 84
Pyrophytes, 464, 466

R

Radiations (évolutives), 490
Radiations ionisantes
effets biologiques, 415, 416, 417
effets des faibles doses, 416 et suiv.
sources technologiques, 421, 422
sources naturelles, 409, 420, 422
Radiation ultra-violettes, 419
Radionucléides, 171, 180, 411
contamination de l'atmosphère, 181, 188, 191
des aliments, 182
de la biomasse, 181, 430, 440 et suiv.
des océans, 432, 433, 434
des sols, 412, 427, 428
Radiosensibilité, phénomènes généraux, 414, 415
des Arthropodes, 415, 416, 417
de l'homme, 415
des insectes, 415
des plantes, 415
des scorpions, 413
Radiostérilisation, 413, 417
Raffineries de pétrole, 441, 368, 369, Pl. XX.
Rajasthan, 221
Rayons X. 407, 413, 418
Rayons γ, 407, 408, 409, 413, 417, 419
Réacteurs nucléaires (voir centrales)
Récifs (coralliens), 43, 44, 96, Pl. IX.
Recyclage des matières premières, 533, 534
Rejecta, 86
Résidus (déchets) radioactifs, 439, 440
Résistance aux insecticides, 314
Respiration, 64, 65, 66, 196, 245
Ressources, 120, 509 et suiv.
alimentaires, 518 et suiv.
en combustibles fossiles, 508 et suiv.
en eau, 514, 529
énergétiques, 508 et suiv.
en matières premières, 513, 514
en pétrole, 508, 509
en protéines, 518, 519
en terres cultivables, 520, 521, 522
Retombées radioactives, 180 et suiv. 421 et suiv.
contamination
des aliments, 182, 428, 431
de l'Océan, 432, 433, 434
Révolution verte, 121, 519
Rhin (pollution), 2, 338
Ripicole (végétation), 353
Ruissellement, 60
Ruptures d'équilibres biologiques, 309
Ruthenium^{106}, 439, 445

S

Sahara, 216, 487
Sahel, 4
Sainte-Baume (Forêt de la), 460, 461, 464, Pl. XXI.
Sajama (Forêt de la), 49
Saltus, 104, 105, 114, 464
Santa-Barbara, 377
Saprophytes, 51. 85, 346 et suiv.
Sarin, 344
Saturnisme, 344
Savanes, 27, 92, 100, 466, 467, 489, Pl. XXII
Sédiments, 70, 76, 77, 79
Sédimentaires
cycles biogéochimiques, 54
dépôts, 64
roches, 12
Seine (pollution de la), 328
Sel, 328, 469
Sicile, 165
Sevin (= Carbaryl), 285, 287
SH_2, 201, 202
Silicose, 268
Silurien, 13, 14
Simazine (herbicide), 285, 306
Smogs, 200, 201, 206, 273, 240, 241
acides, 200, 201, 241
oxydants, (voir brouillards), 205, 206, 241, 267
SO_2, 76, *198* et suiv., 241, 257 et suiv.
effets sur les cryptogames, 258 et suiv.
effets sur les phanérogames, 257, 258
mode d'action du, 261, 262

DU IAST / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Sols
érosion des, 472 et suiv.
ferralitiques, 463, 470, 471
salés, 468, 469
pollution (voir pollution des sols)
Solonetz, 469
Solontchacks, 468
Soufre, 74, 75, 76
SST (voir Supersonique de transport)
Sténothermes, 327
Steppes, 32, 474
Stéroïdes, 304
Stockholm, 259
Stratosphère, 80, 172, 207, 215 et suiv.
Strontium^{90}, 168, 180, 411, 412, 427 et suiv. 431, 439, 444
Structure d'âges, 141, 142
Substances (= composés) organiques de synthèse, 343
Succession, 105 et suiv., 313
Suède, 256
Suess (voir Effets)
Sulfates, 75, 210, *216*, 255, 256
Sulfites, 334
Sulfobactéries, 16, 75, 347
Superphosphates, 275, 276
Supersonique de transport = SST (avion), 233, 234
Surpâturage, 454, 474 et suiv.
Surexploitation des ressources animales, 481 et suiv.
forestières, 454 et suiv.
des océans, 492 et suiv.
Survie (voir Courbes)
Sylva, 104, 105, 114, 464

T

Tabac, 198, 268
Tables de survie, 139
Taïga, 37, 101
Tamise, 327, 329
Tardigrades, 59
Taux
de mortalité, 143 et suiv.
de natalité, 145 et suiv.
Taux de croissance
de populations, 127, 131, 147
de la consommation d'énergie, 507
TDE (= DDD), 177, 375
Technologie (impact sur la biosphère, 111, 112, 113
Telodrine, 377
Températures
inversion de, 239 et suiv.
variations à la surface de la terre, 230, 235
historiques, 236, 237
Tératogenèse, 306
Test-poisson, 366
Tétrapropylène-benzène-sulfonate (= TBS), 338
Thermocline, 353, 355
Thermodynamique, 49
Thérophytes, 27, 28, 466
Tiers-monde, 125, 132, 519
"Torrey-Canyon", 2, 168, *370*, 371, 373
Toundra, 29, 102, Pl. VIII.
Trainées de condensation (= contrails), 226, 232, Pl. XIII.
Transition démographique, 150 et suiv.
Transports routiers, 197, 513
Triazines (Herbicides), 288
Tritium, 410, 422, 511
Trophiques (voir Chaînes)
Troposphère, 172, 173, 219, 223, 225
Turbidité atmosphérique, 219

U

Ultraviolet, 13, 207, 239
Unesco, 1
"*Upwelling*", 271
Uranium, 435 et suiv., 514
Urbanisation, 164

V

Vanadium, 177, 211
Vanoise, 3, 541, Pl. XXX.
Vapeur d'eau, (voir Eau)
Végétation (destruction de la), 453
Vernadsky, 11
Vietnam, 295
Villes
croissance des, 133
pollution de l'air des 191 et suiv., 238 et suiv.
Virus entériques, 331
Volcanisme, 14, 15, 188, 191, 193, 201, 215, 219, 220, 225, 280
Volga, 330

W

Wisconsin, (pollution des eaux dans le), 342, 356

Y

Yellowstone (voir Parcs Nationaux)

Z

Zaïre, 454
Zinc, 211
Zonation de la biosphère, 21
en altitude, 45, Pl. X.
en latitude, 23
Zones
abyssale, 79
bathyale, 79
benthique, 364, 365
de décomposition active, 346
dysphotique, 46
euphotique, 46
humides, 491
pélagique, 96, 374
septique, 350
Zooplancton, 52, 84, 85, 178, 180, 248, 370, 494

BC CAST / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

INDEX TAXONOMIQUE

(Noms d'espèces et groupes supérieurs)

A

Abies alba (Sapin blanc), 53
Abies balsamea (Sapin beaumier), 321
Abies sibirica, 38
Ablette, 362
Abramis brama (brème), 362, 402
Abricotier, 263
Acacia, PI. II et III
Acanthoscelides obsoletus, 415, 418
Accipiter gentilis (autour), 301
Accipiter nisus (épervier), 52, 299, 301, 303
Actinomycétes, 71
Adansonia grandidieri, Adansonia madagascariensis, 477, PI. XXV
Addax nasomaculatus, 487
Adenota Kob thomasini, 101
Aechmophorus occidentalis, 180, 376
Aedes, 321
Aigle chauve, 301
Aigle royal, 301, 303
Aigrettes, 485
Alburnus alburnus, 362
Alca torda, 372
Alcidés, 372
Alces alces (Elan), 38
Alose, 362
Allobophora caliginosa, 299
Ameirus cattus, 376, 399
Ammodytes lanceolatus, 378
Amygdalus sp., 258
Anabaena, 71
Anagallis arvensis, 258
Anas crecca (sarcelle d'hiver), 344
Anas platyrhynchos (canard col-vert), 306, 344
Anatidés, 372
Anatifes, 373
Anchois péruvien, 499 et suiv.
Andropogon, 27
Angiospermes, 13, 257
Anolis, 296
Anoures, 26
Anthonomus vestitus, 311
Antilopes, 27, 37, 539
Antilope saïga, 480
Aonidiella aurantii, 310
Apanteles, 53
Apodya lactea, 347
Aquila chrysaetos (aigle royal), 301
Arachis hypogaea, 298
Arctocephalus philippi, 492
Ardea herodias, 386
Arrhenatum elatius, 308
Arthropodes, 415, 418, 419
Artemisia tridentata, 312
Ascomycétes, 347, 348
Asellus aquaticus, 351
Asperula arvensis, 295
Asterias rubens, 382
Auroch (= *urus*), 486, 487
Autour des palombes, 301
Australopithéques, 123
Avicennia marina, 295
Azotobacter, 70

B

Baccidia luteola, 260
Bacillus oligocarbophilus, 196
Bacillus thuringiensis, 317
Bactérium formicum, 196
Balbuzard, 301, 303
Baleines, 492, 493
Baleinoptera borealis, 493
Baleinoptera musculus, 492
Baleinoptera physalus, 493
Baobabs (voir *Adansonia*)
Beauveria, 317
Bécasse, 299
Beggiatoa alba, 75, 347
Bison antiquus, 113, 478
Bison d'Amérique, 37, 482, 483, PI VII
Bison d'Europe, 480
Bithynia tentaculata, 397
Boreogadus saida, 236
Bos sauveli, 487
Bos primigenius (voir auroch)
Bouquetin des Alpes (= *Capra ibex*), 4, 541, PI. XXX
Brachypodes, 466
Brachypodium ramosus, 466, 467
Braconides, 481
Brassica oleracca (= chou), 261
Brugueria conjugata, 295
Brugueria parviflora. 295

C

Cachalots, 493
Cactées 28, 32, Fig. 1, 5 a et b
Cactoblastis cactorum, 322
Calandra oryzae, 136

BCASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Callinectes sapidus, 376
Campephilus principalis, 489
Canard col-vert, 306, 344
Cancer pagurus, 371
Capra ibex (bouquetin), 4, 541, Pl. XXX
Carchesium, 347, 349
Carex, 39
Carya, 33
Céphalophes, 485 .
Cerisops candoleana, 295
Cervus eluphus (Cerf d'Europe), 34, Pl VI
Cesalpinées, 295
Cétacés, 492 et suiv.
Chalcidien, 53, 317, PI, XXVIII
Champignons 20, 38, 364, 395
Choaborus astictopus, 375
Chêne kermès, 461, 466
  rouvre, 459
  vert, 461
  pubescent, 460, 463
Chêne sclérophylles, 32, 459, PI. IV
Chenille tordeuse des conifères, 307
Chèvres, 460, 461
Chilocorus bipustulatus, 316
Chironomes, 346
Chironomus thumni, 350
Chlorella, 81, 365
Choristoneura
  fumiferana, 295, 307
  murinana, 54
Chouettes
  Chevêche, 299
  Effraie, 299
  Hulotte, 299, 300
Chrysomela hyperici, 322
Chrysopogon, 466
Cigognes, 487
Ciliés, 348
Cistus albidus, 466
Citrus, 310
Cladocères, 396
Cladonia, 39, 180, 261
Cladonia coniocraca, 260
Cladophora glomerulata, 351
Clostridium, 70
Clostridium welchii, 196
Cnidaires, 194
Coccolithus, 366
Cochenille, 310, 315, 316
Cochliomya hominivorax, 318
Coenotus, 465
Colin de Virginie, 296, 305
Colpidium, 348
Columba palumbus (pigeons ramier), 296
Conuropsis carolinensis. 485
Cooksonia, 13
Copépodes, 43, 396
Coq de prairie, 481
Corègones (*coregonus fera*), 362
Cormoran (*Phalacrocorax* sp.), 342
  huppé, 53
  de Bougainville, 500
Coregonus fera, 362
Coton, 284
Crabes, 371, 376
Crassostrea virginica, 178, 375
Crevettes, 375
Creosote, 32
Crustacés, 179
Cryptogames, 258
Culex, 351
Culicides, 321, 375
Cyanophycées, 70, 359, 395
Cynomys, 37, Pl VII
Cyprinidés, 307, 362, 400

D

Dacus oleae, 316
Dactylis glomerata, 308
Damaliscus albifrons, 483
  dorcas, 483
Daphnia pulex, 396, 418, 419
Daucus carotta (carotte), 298
Delphinium, 295
Dendragapus obscurus, 295
Desulfovibrio, 75, 255, 347
Diatoma hiemale, 351
Dicotylédones, 287, 295, 308
Didermoceros sumatrensis, 485
Didiéracées, 477, PI. XXV
Dinornithides, 113
Ditylenchus dipsaci, 419
Drepaniides, 491
Dunaliella, 342, 365, 366
Dysdercus peruvianus, 311

E

Echimyidés, 492
Echinocardium cordatum, 372
Ectopistes migratorius, 481
Ectoproctes, 397
Effraie (voir chouette)
Eléphant, 460, 485, 486
Engraulis ringens, 499, 500, 501
Ensis siliqua, 371
Eobacterium, 12
Epervier, 52, 299
Ephémères, 351, 352, 368
Epicea, 38, 263, 455
Epistylis, 349
Equille, 378
Equus Zebra (zèbre de montagne), 485
Eristalis, 350
Erithacus rubeccula, 140
Eryngium, 474
Esturgeon, 330
Euglena, 349
Euphausiacés, 494

F

Faisan, 301, 305

BAU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Falco peregrinus (= faucon pélerin), 302
Falco sparverius (= faucon de prairie), 304
Faucon pélerin, 302, 303, 304, 316, Pl. XVII
Faucon de prairie, 304
Festuca rubra, 308
Flamants roses (= *Phoenicopterus ruber*), 488, Pl. XXVII
Fou de bassan, 372
du Pérou, 500
Fouquiera arizonica, 28, Fig. 1,5 b
Fratercula arctica (voir Macareux moine)
Fringilles, 300
Fucus, 177
Fulmarus glacialis, 342
Fusarium aqueductum, 348

G

Gadus ogac, 236
Galathea strigosa, 371
Gallinacés, 300
Gambusia, 368
Gammarus pulex, 368
Gardon, 361
Gentianes, 263
Geotrichum, 348
Glaucoma, 348
Glycine maxima (soja), 298
Glyptodonte, 113
Goeland argenté, 303, 305
Gomphonema parvulum, 349
Gorille de montagne (*Gorilla beringuei*), 490
Grand Duc, 303
Grèbes, 299, 376, Pl. XVII
Grimpereaux
Grive, 299
Grizzly, 39, 486
Grues, 486, 487, 491
Grus americana, 486
Guillemots, 372, Pl. XIX
Gunflintia, 13
Gymnospermes, 13

H

Haliethus albicilla (= pygargue), 343
leucocephalus (aigle chauve), 301
Halosphaera, 370
Hareng, 343, 497
Heliothis zea, 312
Heliothis virescens, 311
Héron, 299
Héron bleu, 386
Hêtre, 33, 455
Hexagenia, 383
Hippotragus leucophaeus, 483
Hominiens, 111
Homo, 123
habilis, 111
sapiens, 111, 112, 127
Huîtres, 178, 331, 375, 376
Hulotte (voir chouette)
Hydromamalis stelleri, 492
Hyloconium, 264
Hypnum, 264
Hypogymnia physodes, 260

I

Icerya (= *Pericerya*) *purchasi*, 315, 419, Pl. XVIII
Ichneumonides, 54, Pl. XVIII, 317
Idotea metallica, 373
Imperata, 27, 466
Insectes, 56, 84, 287, 350, 418, 441, 460
Isopodes, 373

K

Kangourous, 37, 484

L

Lagerstroemia, 295
Lagopède des saules, 301
Lamellibranches, 371
Laminaires, 177
Lamproie marine, 362
Lapin, 292, 491
Laridés, 372
Larix sibirica, 38
Larrea divaricata, 32
Lecanora conizaeoides, 260
Lémuriens, 479, 490
Lepas anatifera, 373
fascicularis, 373
Lepus europeus (lièvre), 292
Leuciscus rutilus, 362
Lichens, 36, 38, 39, 257 et suiv.
Liliacées, 263
Limnodrilus, 351
Lion d'Asie, 480, 485
Liquidambar, 33
Liriodendron, 33
Loxodonta africana, 460
Lumbricus terrestris (ver de terre) (= lombric), 299
Luzerne, 284, 298
Lychnis githago, 295
Lymantria dispar, 319

M

Macareux moine (*Fratercula arctica*), 2, 372
Macreuses noires, 372
Macropus rufus, 37
Maia squinado, 372
Maïs, 298
Malus, 258
Mangouste, 491
Mantis religiosa, 236
Marsupiaux, 484, 487
Marthasterias glacialis, 372
Medicago sativa (luzerne), 298
Megaptera noveangliae, 493
Melanitta fusca (Macreuse noire), 372
Melosira, 349
Mélèze, 263

BU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Metarhizium, 317
Methanosarcina barkerii, 196
Mollusques, 42, 178, 371, 396, 397
Monochrysis, 365
Monodontomerus, 54
Monocotylédones, 257
Mouche domestique, 136, 139, 140
Mouettes, 179, 341
Mouflon, 538
Mougeotia, 359
Moustiques (voir Culicides)
Moutons, 138, 460
Mucor, 348
Musca domestica (Mouche domestique), 139, 140, 417, 419

N

Navicula, 350, 395
Neocytis, 194
Nitrosocytis oceanus, 74
Nitrosomonus, 74
Nitzschia palea, 349
Nostoc, 71, 73
Novius cardinalis, 315

O

Oceanites oceanicus (Pétrel de Wilson), 342
Oceanodromma leucorhoca (Pétrel de Leach), 342
Odocoileus hemionus, 140, 141
Oligochètes, 178
Ombles, 362
Oncorrhynchus, 400
Opius concolor, 316
Opuntia sp. 29, 32, 321, 322, fig. 1,5a
Oryctolagus cuniculus (lapin domestique), 292, 491
Oscenedesmus, 81
Oscillatoria sp. 349, 366, 396
Oscillatoria rubescens, 358, 359
Otaries, 492
Ours, 34, 39, Pl XI

P

Paléanthropiens, 111, 123
Pandion haliethus (Balbuzard), 301
Pandorina, 350
Papaver rhoeas, 306
Parlatoria blanchardii, 316
Parus, 52
Parmelia saxatilis, 261
Parmelia sulcata, 260
Pecten, 177
Pelecanus erythrorhynchos (Pélican blanc d'Amérique), 342
Pellecyphorus pantex, 415
Penaeus, 376
Penicillium, 348
Pennisetum, 27
Perdrix, 301
Peridinium, 366
Perca fluviatilis, 367
Perlides, 368
Petrels, 342
Petromyzon marinum, 362
Phaeodactylum, 365
Phalacrocorax aristotelis (Cormoran huppé), 53, 368, Pl. XIX
Phalacrocorax auritus, 342
Phalacrocorax bougainvillei (Cormoran de Bougainville), 500
Phanérogames, 257
Philohela minor (Bécasse américaine), 299
Phoques, 42, 343, 492
Phormidium sp, 349
Phoxinus laevis (vairon), 368
Phryganes, 351
Physalia physalis, 194
Picea, 38
Pigeon migrateur, 481 et suiv.
Pigeon ramier, 299
Pilchard, 2, 370
Pin d'Alep, 465, 466, Pl. V
  maritime, 466
  sylvestre, 38, 264
Pinus halepensis, 467, Pl. V
  ponderosa, 465
  sylvestris, 265
Pirus, 258
Plantago lanceolata, 258
Platymonas sp. 366
Platyrhiniens, 485
Pleurozium, 264
Poa pratensis, 308
Podiceps cristatus, 316, Pl. XVII
Poisson-chat, 376, 400
Polylepis, 49
Pomme de terre, 120, 284, 298
Porphyra, 422, 423, 441, 442
Portunus puber, 371
Poule d'eau, 299
Prasinophycées, 342
Primates, 490
Procellariiformes, 342, 372, 485
Pronghorn (antilope), 37
Prospatella perniciosi, 316
Protococcus, sp, 365
Protozoaires, 346, 395
Pseudomonas, 74
Pseudotsuga menziesii, 295
Psittaciformes, 485
Psychoda, 350
Pterocarpus, 295
Pterodroma cahow (Petrel des Bermudes), 342
Pterosperma, 370
Puffinus (Puffins) *creatopus*, 342
  griseus, 342
  gravis, 342
Pygargue, 300, 343
Pyramimonas, 366
Pyrrhocoris apterus, 321

Q

Quadraspidiotus perniciosus, 316
Quagga, 483
Quercus coccifera, 461, 466, Pl. V
  Ilex, 461
  pubescens, 459
  suber, 465

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

R

Radis, 298
Ramalina farinacea, 260
fraxinea, 260
Ramier (voir pigeon)
Raphanus sativus (radis), 298
Renne *(Rangifer tarandus),* 38, 180
Rhinocéros de Java, 485, 486
Rhinoceros sondaicus, 485
Rhinocéros de Sumatra, 485
Rhinocéros unicorne de l'Inde (*Rhinoceros unicornis)* 480, 485, 486
Rhizobium, 71
Rhizophora conjugata, 295
Rhodospirillum, 70
Rhus, 465
Rhytine de Steller, 492
Rorqual bleu, 493
commun, 493
Rotifères, 59
Rumex, 474

S

Sabellaria, 371
Saccharomyces cerevisiae, 137
Salmo gairdneri, 368
salar, 376
trutta, 362
Salmonides, 307, 360
Salvellinus alpinus, 362
Sapin blanc, 53, 263, 455
Sapin beaumier, 321
Sarcelle, 344
Sardine du Pacifique (= *Sardinops coerulea),* 498
Saumon, 42, 307, 308, 399
Scolytes de l'orme, 299
Scomberesox saurus, 374
Sequoia gigantea, 540
Sequoia sempervirens, 35, 36
Serinus canaria, 236
Siphonophores, 194
Siréniens, 492
Skeletonema, 366
Smilax aspera, 466
Smithiavirus pithyocampae, 317
Soja, 298
Solanum tuberosum (Pomme de terre) 298
Solenodon, 492
Solenopsis sœvissima, 296, 299
Souslik, 37
Sphaerotilus natans, 347, 351
Spirogyra, 350
Squalius cephalus (chevesne), 368
Staphylocoques, 331
Stellaria media, 258
Stephanitis pyri, 284
Sternes, 179
Caugeck, (= *Sterna sandwicensis*), 377
Stigeoclonium tenue, 349
Streptopelia decaocto, 236
Strix aluco (chouette hulottes), 300
Sula bassana, 372
peruviensis, 500
variegata, 500
Surirella sp. 350, 395

T

Tabellaria fenestrata, 358
Tachinaire, 54, 297, Pl. XVIII.
Taurotragus d. derbianus, 487
Téléostéens, 367, 369
Thamnophis, 296
Themeda, 27, 467
Thiobacillus, 75
Thon, 379
Tichogramma, 316
Tinca vulgaris (tanche), 368
Tortrix, 52
Trebouxia, 261
Trematomus, 400
Trichodesmus, 71
Trogloderus costatus, 417
Truite, 361
Truite de lac, 361
Truite arc-en-ciel, 376
Tsuga canadensis (Hemlock), 38
Tubifex, 350, 352
Turdus migratorius (merle migrateur), 300
Typanichus cupido, 481
Tyroglyphus sp. 419

U

Ulothrix, 349
Uria aalge, 372
Urus (voir Auroch)
Ursus arctos, 39
Ursus americanus, 39, Pl. XI
Ursus horribilis, 39

V

Vairon, 368
Vejovis confusus, 415
Vers de terre (Lumbricidés), 34, 299
Vigne, 263

X

Xénarthres, 113, 478

Y

Yeuse, 461, Pl. IV
Yucca, 32, fig. 1,5 a

Z

Zea mays (maïs), 298
Zèbres, 27

BOAST / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. et Mme Aymonin-Keraudren, Mlle C. Boulard, M. C. Chararas, Mlle A. Kerneis, MM. les Professeurs M. Lamotte et G. Lemee, M. J.M. Pinet, Mme M. Raabe et M. H. Vidal qui nous ont aimablement cédé plusieurs clichés photographiques pour illustrer cet ouvrage.

Nous remercions également M. G. Aymonin et Mme S. Maynard, de l'Université de l'Utah, qui nous ont aidé à déterminer les cactées des fig. 1,5 a et b.

Figure 1.25. – reproduite d'après Colinveaux, *Introduction to Ecology* John Wiley & Sons, Inc., Copyright © 1973. Tous droits réservés.

Figure 1.32. – reproduite d'après S. Charles Kendeigh, *Animal Ecology,* © 1961, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Figure 2.6 – reproduite d'après Bogue, *Principles of Demography,* John Wiley & Sons, Inc., Copyright© 1969. Tous droits réservés.

Figures 2.8 B, 2.11 B, 2.13. – reproduites d'après Edward J. Kormondy, *Concepts of Ecology,* © 1969, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Figures 4.3, 4.4, 4.5. – reproduites d'après Pitts & Metcalf, *Advance in Environmental Sciences and Technology,* John Wiley & Sons, Inc., Copyright © 1969. Tous droits réservés.

Figures 4.19 et 7.18. – reproduites d'après Hood, *Impingment of Man on the Ocean,* John Wiley & Sons, Inc., Copyright © 1971. Tous droits réservés.

Figure 6.12. – reproduite d'après Mitchell, *Water Pollution Microbiology,* John Wiley & Sons, Inc. Copyright © 1972. Tous droits réservés.

Figures 8.12 et 8.28. – reproduites d'après Dasman, *Environmental Conservation,* John Wiley & Sons, Inc., Copyright © 1972. Tous droits réservés.

Figure 8.21. – d'après Kowalski, *Science Progrès Découverte,* avril 1971, Dunod, Editeur, Paris.

BOWLING GREEN STATE UNIVERSITY LIBRARY

TABLE DES MATIERES

Pages

Avant-propos
Introduction 1

PREMIERE PARTIE :
STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA BIOSPHERE : SES INTERACTIONS AVEC L'ESPECE HUMAINE 7

Chapitre I — La notion de biosphère 11

Qu'est-ce que la biosphère ? 11
Définition, structure et évolution 11
Chaînes et réseaux trophiques 51
Circulation de la matière dans les écosystèmes
Les grands cycles biogéochimiques 57
Deux phénomènes biologiques fondamentaux conditionnent la circulation du carbone dans la biosphère : la photosynthèse et la respiration 58
Productivité des écosystèmes 91
Productivité secondaire 99

Chapitre II — Les facteurs de dégradation de la biosphère : leur nature, leur importance 111

Impact de la technologie 112
L'explosion démographique humaine 122
Prospectives démographiques : catastrophe ou stabilisation ? 147

DEUXIEME PARTIE :
LA POLLUTION DE LA BIOSPHERE 159

Chapitre III — Le problème des pollutions et ses implications écologiques 163

Nature et modalités de pollution de l'environnement 163
Dispersion et circulation des substances polluantes dans la biosphère 172

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Pages

Chapitre IV — Pollution atmosphérique 187
Principaux polluants atmosphériques 188
Principaux polluants gazeux 191
Les poussières "aérosols" 208
Effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes 221
Conséquences climatiques 221
Pollution atmosphérique et cycles biogéochimiques 244
Conséquences de la pollution atmosphérique pour les espèces et les biocœnoses 257

Chapitre V — La pollution des sols 273
Modalités et conséquences de la pollution des sols par l'agriculture moderne 274
La lutte biologique 313
Méthodes qui influencent la mortalité 315
Méthodes qui affectent la natalité 318

Chapitre VI — Pollution des eaux continentales et océaniques 325
Nature et importance de la pollution des eaux 327
Conséquences écologiques de la pollution des eaux 345

Chapitre VII — La pollution nucléaire 407
Notions de radiobiologie 410
Conséquences écologiques des retombées radioactives 426
Conséquences écologiques de la pollution par l'industrie nucléaire 435

TROISIEME PARTIE :
LA SUREXPLOITATION DES RESSOURCES NATURELLES ET LA LIMITE DE LA BIOSPHERE 449

Chapitre VIII — La dégradation des biocœnoses et la ruine de la biosphère 453
La destruction de la végétation 453
Altération physico-chimique des sols 468
L'extermination de la faune 477

Chapitre IX — Les limites des ressources de la biosphère 505
Limites énergétiques 506
Les ressources en matières premières 513
Les ressources en eau 514
Les ressources alimentaires 518

Chapitre X — Conservation de la nature 537
La protection de la biosphère, une impérieuse nécessité 537

On trouvera au début de chaque chapitre une table détaillée

RCUAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY